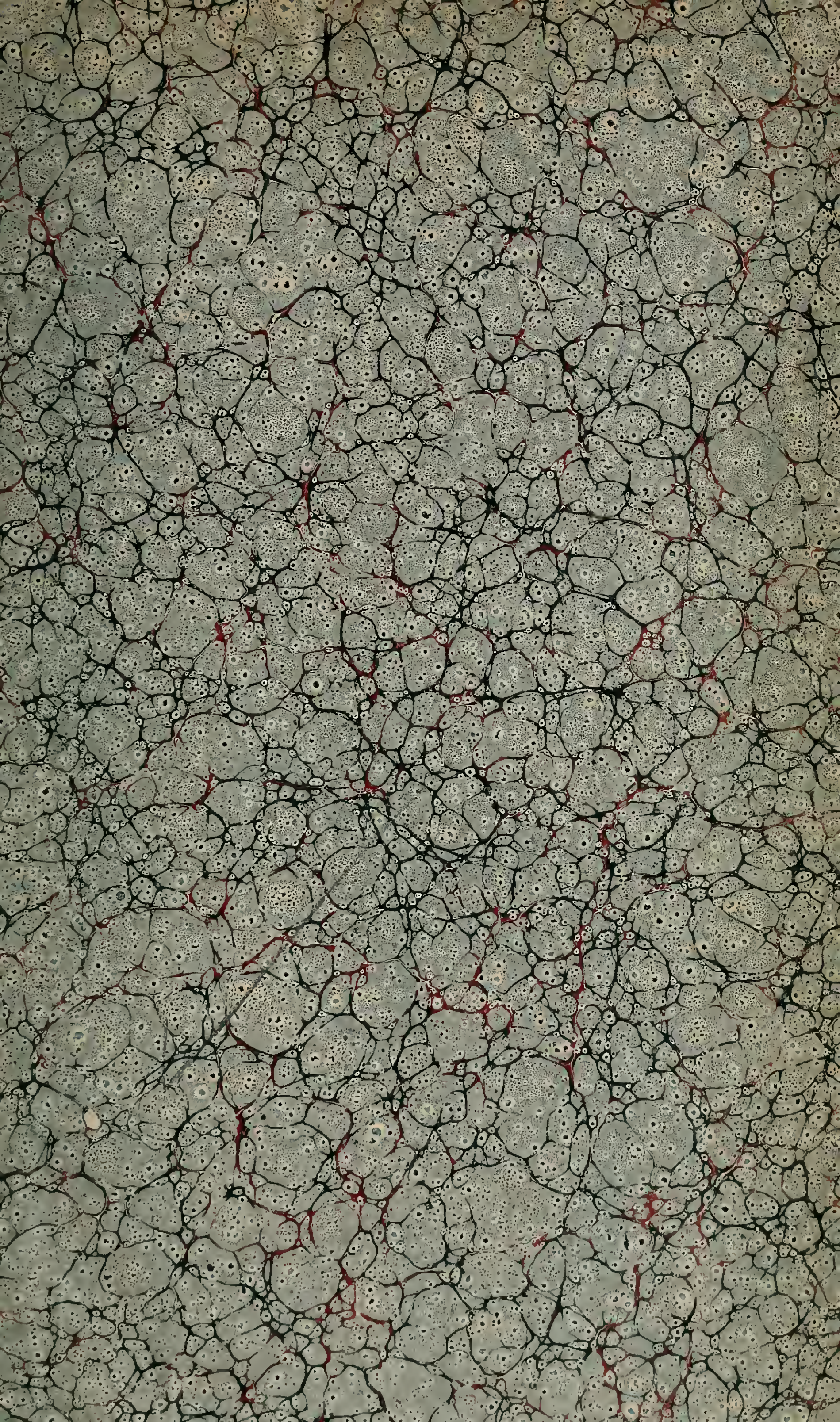
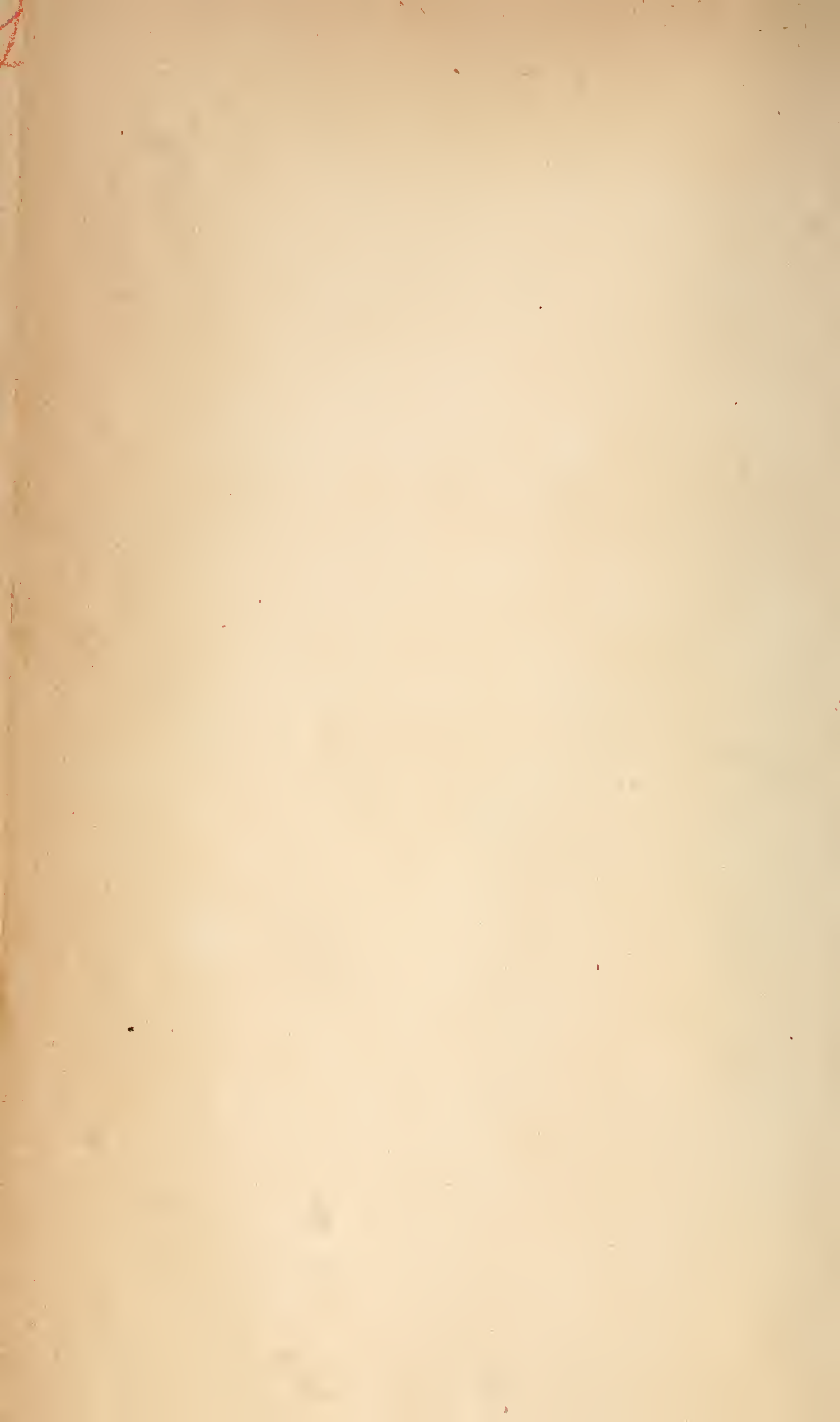








PHYSIOLOGIE EXPÉRIMENTALE

TRAVAUX

DU LABORATOIRE DE M. MAREY

CLICHY. — IMP. PAUL DUPONT, 12, RUE DU BAC-D'ASNIÈRES. — (685, 9-5.)

ÉCOLE PRATIQUE DES HAUTES ÉTUDES

PHYSIOLOGIE EXPÉRIMENTALE

TRAVAUX

DU

LABORATOIRE DE M. MAREY

PROFESSEUR AU COLLÉGE DE FRANCE

ANNÉE 1875

Avec 160 Figures dans le texte

PARIS

G. MASSON, ÉDITEUR

LIBRAIRE DE L'ACADÉMIE DE MÉDECINE

Place de l'École-de-Médecine 17

MDCCCLXVI.

PRÉFACE

La physiologie est restée pendant longtemps une science isolée; définie par Haller : *Anatome animata*, elle semblait n'être abordable qu'à de rares initiés.

Aujourd'hui, sans négliger les études anatomiques qui lui servent de point de départ, la physiologie donne la main aux autres sciences; elle emprunte leur concours pour étudier les phénomènes physiques, chimiques ou mécaniques, dans les organes et dans les tissus vivants.

Le défaut de précision était autrefois le triste caractère des études physiologiques ; on niait même que les actes de la vie fussent soumis à des lois rigoureuses, parce qu'on ne pouvait encore discerner ces lois. Mais les vivisections habilement pratiquées montrèrent qu'un phénomène peut être reproduit avec certitude et toujours identique à lui-même, quand on se place dans les conditions voulues. L'expérimentation des physiologistes put dès lors prétendre à la même rigueur que celle des physi-

ciens : pour l'atteindre, il fallait recourir aux méthodes et aux appareils qui donnent les mesures exactes.

Il serait puéril de chercher à prouver que la physique et la chimie n'ont progressé qu'en raison des perfectionnements de leurs méthodes et de leurs instruments ; pourquoi la physiologie n'eût-elle pas cherché aux mêmes sources le progrès que les autres sciences ont atteint ?

Toutes les sciences sont sœurs, a-t-on dit; toutes les sciences n'en forment qu'une, pourrait-on dire, quand on considère que la grande loi de la conservation de la force domine à la fois les phénomènes du monde inorganique et ceux du monde organisé.

Que fait donc un physiologiste de si différent d'une expérience de physique ou de chimie? Étudier des mouvements, mesurer des efforts, des volumes, des températures, des poids, des durées, c'est à cela que se réduit toute expérimentation.

Or, de tous les moyens de mesure rigoureuse que la science possède, la méthode graphique me semble être le plus puissant, le plus simple et le plus susceptible d'un emploi généralisé. J'ai consacré bien des années à étendre l'usage des appareils inscripteurs, à les multiplier, à les perfectionner. On verra dans ce volume et dans ceux qui doivent le suivre, quelle netteté surprenante peut revêtir une expérience de physiologie lorsqu'elle est faite au moyen d'une méthode qui pourtant n'est encore qu'à son enfance. Ces avantages ont frappé la plupart des savants; les appareils inscripteurs se répandent partout, dans les observatoires des astronomes et des météorolo-

gistes, dans les laboratoires de physique et dans ceux de physiologie.

Aujourd'hui, ma conviction est faite : presque tout ce qui est phénomène objectif, c'est-à-dire changement d'état de la matière, peut être étudié par cette méthode ; n'y pas recourir, se borner à l'observation pure et au témoignage insuffisant des sens, ce serait se condamner volontairement à l'erreur.

Cette vérité a été comprise. Après avoir été pendant longtemps l'initiateur et le seul représentant de cette méthode parmi les physiologistes français, j'ai vu cesser enfin cet isolement pénible ; un accueil sympathique a été fait à mes travaux, l'emploi de mes instruments s'est rapidement répandu ; enfin, le laboratoire où je travaillais seul compte aujourd'hui parmi ses élèves ou ses hôtes assidus de jeunes hommes animés d'un grand zèle pour la recherche ; grâce à leur concours, dont je les remercie, j'espère voir s'étendre rapidement le champ de nos études expérimentales.

Le lecteur trouvera dans ce volume plusieurs mémoires d'où se dégagent d'importantes applications pratiques.

Ainsi, comme conséquence d'études sur la fonction musculaire, sur la manière dont le travail s'engendre dans le muscle et se transmet au dehors, j'ai été conduit à proposer un moyen de mieux utiliser le travail des moteurs animés, c'est-à-dire de diminuer la fatigue de l'homme et celle des animaux.

Dans un autre travail ayant pour objet l'étude de la pulsation du cœur, je montre comment on peut inscrire

la forme de cette pulsation chez l'homme sain ou malade et comment, d'après la forme du tracé obtenu, on peut reconnaître, plus sûrement que d'après aucun autre signe, la manière dont s'exécute la fonction du cœur.

J'ai longtemps ajourné la publication de ces recherches, sachant que toute innovation dans la pratique médicale ne doit être présentée qu'avec de grandes réserves et seulement lorsque l'exactitude des propositions qu'on avance peut être démontrée. Cette démonstration, je la possède aujourd'hui. Elle consiste à reproduire le mécanisme du cœur, dans des conditions tout artificielles, au moyen d'un appareil qui imite, dans leur structure et leur fonction, le cœur et les gros vaisseaux. Avec ce mécanisme, non-seulement on obtient la pulsation du cœur et les bruits valvulaires, tels que nos sens les perçoivent sur l'homme et sur les animaux, mais, en soumettant aux appareils inscripteurs la pulsation de ce cœur factice, on obtient des tracés identiques à ceux que donne la pulsation d'un cœur véritable.

Ce genre de démonstration ne s'adresse pas seulement aux physiologistes et aux médecins, mais à tout le monde, car personne ne saurait contester que reproduire un phénomène complexe et variable, avec tous ses détails et toutes ses variations, c'est prouver qu'on en connaît exactement la nature.

A propos du pouls artériel, j'ai dû reprendre, dans des conditions nouvelles, l'étude des ondes liquides qui se forment dans les conduits élastiques, lorsqu'il se produit

des impulsions intermittentes comme celles du cœur sur le liquide sanguin.

Bien que j'eusse depuis longtemps signalé la cause du rebondissement ou dicrotisme du pouls, que j'eusse prouvé que l'existence de ce phénomène est à peu près constante et montré qu'il est d'ordre purement physique, je n'avais pas encore une connaissance complète du trajet des ondes sanguines dans le système artériel, j'avais même sur ce point émis certaines idées inexactes. Le mémoire n° 3 a pour objet de préciser la nature de ce phénomène, et d'étudier les caractères et les mouvements des ondes liquides dans toutes les conditions possibles.

La fonction si importante des nerfs vasculaires devra s'éclairer beaucoup par les progrès ultérieurs de l'anatomie ; mais il existe, dès à présent, dans la science un grand nombre de notions dont l'importance semble parfois avoir échappé et dont la valeur serait extrême si elles étaient coordonnées et mises en lumière.

M. le Dr François-Franck s'est chargé de cette tâche laborieuse; dans le mémoire ayant pour titre : *Des nerfs vasculaires de la tête*, on trouvera exposé clairement l'un des points les plus compliqués de l'anatomie humaine et comparée.

Pour terminer ce qui est relatif à la circulation, je signalerai les études sur la vitesse et la pression du sang exposées dans le mémoire n° IX, avec les lois qui président aux changements de cette pression et de cette

vitesse, suivant qu'il se produit une modification dans l'action du cœur ou dans la circulation vasculaire.

Les physiologistes manquaient d'un moyen qui permît de discerner avec certitude la cause de certains changements circulatoires; aussi, l'interprétation des résultats de leurs expériences laissait-elle place à des doutes qui n'existeront plus désormais.

Dans la plupart des mémoires contenus dans ce volume, la physiologie côtoie la physique, souvent même les limites artificielles qui séparent ces deux sciences ont dû être franchies. C'est ce qui est arrivé particulièrement au sujet du mécanisme du vol des oiseaux à propos duquel j'ai dû faire quelques expériences sur la résistance de l'air.

Du reste, les physiologistes se trouvent à chaque instant en présence de semblables nécessités. C'est par la chimie qu'ils éclairent les phénomènes de la digestion et des sécrétions; c'est par la physique qu'ils ont porté la physiologie des sens à un degré de précision admirable; c'est la mécanique enfin qui seule permet de comprendre comment s'engendre au sein des tissus la force motrice qu'on voit associée à toutes les manifestations de la vie.

Paris, le 30 septembre 1875.

MAREY.

TABLE DES MÉMOIRES

CONTENUS DANS CE VOLUME.



PHYSIOLOGIE EXPÉRIMENTALE

Travaux du Laboratoire de M. le professeur MAREY.

I

DU MOYEN D'ÉCONOMISER LE TRAVAIL MOTEUR DE L'HOMME ET DES ANIMAUX

Rôle de l'élasticité dans les appareils moteurs des êtres vivants.

Un des points les plus intéressants de la physiologie du mouvement chez les animaux, c'est la détermination du rôle de l'élasticité des tissus. Partout où le mouvement existe dans l'organisme vivant, on voit associée à sa production l'élasticité de quelque organe. Ainsi, dans l'appareil circulatoire, on trouve les vaisseaux doués d'une élasticité extrême; dans celui de la respiration, le poumon est très-élastique également; enfin, la fibre musculaire elle-même, outre sa propriété de contractilité, possède une élasticité très-grande.

Montrer que l'élasticité des organes n'a pas seulement pour effet de régulariser les mouvements dont ils sont le siége, mais qu'elle accroît le travail utile qui s'accomplit en eux, telle a été depuis longtemps ma préoccupation; et je crois avoir prouvé que dans la circulation du sang, aussi bien que dans l'action des muscles volontaires, l'élasticité joue un rôle indispensable.

Dans la circulation, l'élasticité de l'aorte et des artères n'a pas pour effet unique de transformer en écoulement continu le mouvement saccadé et intermittent produit par le cœur. A cette influence depuis longtemps connue, s'en ajoute une autre plus importante encore et sur laquelle l'attention des physiologistes ne s'était pas arrêtée : l'*élasticité des artères économise le travail du cœur.*

On prétendait prouver autrefois que, sous le point de vue dynamique, l'élasticité artérielle ne pouvait être utile, car elle n'augmente pas la production de travail ; que si, pendant le repos du cœur, le sang obéit au retrait élastique des artères et continue à se mouvoir, il ne faut voir, dans cet effet, que la restitution d'une force empruntée, car c'est la force du cœur qui a distendu les vaisseaux dont le resserrement agit plus tard. On concluait donc qu'au point de vue de la quantité du travail produit, l'élasticité artérielle est indifférente.

Dans ce raisonnement, on oubliait que tout problème dynamique présente un double point de vue : celui du travail moteur dépensé et celui du travail résistant qui lui est égal. Or, ce dernier se décompose en travail utile et en travail inutile ou même nuisible. S'il s'agit du mouvement d'un liquide, on pourra accroître le débit de l'appareil hydraulique (c'est-à-dire le travail utile), non-seulement en accroissant le travail moteur, mais en supprimant certaines résistances nuisibles. Ce dernier rôle est précisément celui de l'élasticité artérielle.

Après avoir montré que dans la circulation du sang l'élasticité des artères diminue certaines résistances qui tiennent à l'inertie du liquide, et pour employer une expression usuelle, à ses frottements dans les vaisseaux, j'ai vérifié la théorie par l'expérience en faisant voir que, sous l'influence d'afflux intermittents, un tube élastique verse plus de liquide qu'un tube inerte.

Enfin, puisant dans l'anatomie pathologique une vérification nouvelle, j'ai donné la raison de l'hypertrophie du cœur qui accompagne la perte d'élasticité des artères chez les vieillards. En effet, l'hypertrophie, se produisant toujours dans un muscle qui éprouve une résistance exagérée, devait arriver

quand l'élasticité artérielle est perdue, s'il est vrai que l'élasticité diminue certaines résistances (1).

Ces vues ont trouvé une application plus générale lorsqu'à propos des actes musculaires je constatai que, dans tout muscle, le mouvement s'engendre d'une manière saccadée. Que si nous pouvons effectuer un effort dans lequel nos muscles soient dans un état de raccourcissement permanent, ce n'est là qu'un effet de l'élasticité du muscle qui fusionne et emmagasine une série de secousses successives, de même que l'élasticité artérielle fusionne les afflux saccadés du cœur en une tension presque uniforme des petits vaisseaux.

De cette analogie entre les phénomènes de la circulation et ceux de l'action musculaire, au point de vue de la transformation du mouvement, il n'y avait pas loin à conclure qu'au point de vue de l'utilisation du travail, l'élasticité musculaire présente la même utilité que celle des vaisseaux. Sans elle, en effet, il se produirait dans les muscles, à chacune des secousses qui tendent à les raccourcir, des chocs destructeurs du travail et des organes eux-mêmes (2).

Enfin, en étudiant les phénomènes de la locomotion chez les différentes espèces animales, en constatant les saccades plus ou moins prononcées du mouvement de progression propre à chacune d'elles, je fus amené à conclure que dans la traction des fardeaux, les moteurs animés doivent éprouver de véritables chocs, s'ils appliquent leurs efforts saccadés à des masses considérables; qu'une partie de leur travail moteur doit ainsi se dépenser en pure perte, et qu'il y aurait avantage à appliquer leurs efforts de traction au moyen de traits élastiques. Des expériences faites pendant les années 1872-73 et dont les résultats ont été exposés dans mes leçons au Collége de France (3) ont montré que le travail moteur nécessaire pour traîner une voiture est moindre quand on emploie à cet usage un trait élastique.

Pour la vérification de ces faits, j'ai dû construire un dynamomètre enregistreur spécial dont la description n'a pas

(1) *Physiologie médicale de la circulation du sang*, p. 127. — Paris, 1863.

(2) *Du Mouvement dans les fonctions de la vie*, p. 465. — Paris (Germer-Baillière), 1868.

(3) Voy. *La Machine animale*, p. 129. — Paris (Germer-Baillière), 1873.

encore été publiée. Cet instrument a été présenté au congrès de l'Association française pour l'avancement des sciences, session de Lille, séance du 27 août 1874. Dans cette même séance a été lu le mémoire suivant :

Du moyen d'économiser le travail moteur de l'homme et des animaux.

De récentes expériences sur la locomotion animale, dont le résultat a été publié ailleurs (1) avec les développements qu'elles comportent, m'ont fait voir que, chez tous les animaux, la locomotion s'effectue par mouvements saccadés.

Cette irrégularité dans le mouvement de progression n'est pas également accusée à toutes les allures. La marche lente présente le maximum d'inégalité, la course, le minimum.

En analysant avec soin le phénomène, on constate que le corps reçoit une impulsion nouvelle à chaque demi-pas, au moment où l'un des pieds termine son appui. Un ralentissement se produit, au contraire, chaque fois qu'un des pieds arrive au contact du sol.

Lorsqu'un homme ou un animal attelé à une voiture la traîne sur un chemin, ses efforts tendront à imprimer au véhicule une vitesse irrégulière ; d'autre part, les résistances éprouvées dans le tirage présenteront aussi des irrégularités ; mais, chose remarquable, ces irrégularités seront d'autant plus grandes que l'allure sera plus rapide.

Ainsi, l'homme qui court en liberté progresse d'un mouvement presque uniforme; mais s'il doit courir en traînant un fardeau, il éprouve, même sur un terrain uni, des résistances très-irrégulières qui impriment à son corps des secousses pénibles.

Cela vient de ce que les efforts musculaires qu'on développe dans la course ont une intensité et une durée proportionnées à la masse du corps qu'ils sont destinés à transporter ; mais ils sont beaucoup trop brefs pour se transmettre, à la fois, au corps du coureur et à la masse additionnelle que celui-ci doit déplacer.

(1) Voir *la Machine animale*, p. 127, et *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, t. LXXIX, p. 125.

Examinons un homme qui tire une voiture à bras, au moyen d'une de ces bricoles de cuir en usage à Paris. Si le terrain est plat, ou légèrement montant, on voit que la courroie est alternativement relâchée et tendue; que, si le marcheur presse le pas, les tensions de la courroie se font plus brusquement; enfin que, s'il essaie de courir, la tension de la courroie produit un coup sec, un véritable choc.

Pour mieux juger de ce qui se passe, il faut s'atteler soi-même à cette voiture. En marchant sur un terrain uni on sent assez faiblement l'effet des secousses; mais si on presse l'allure, on éprouve, à chaque tension de la courroie, une commotion assez forte qui produit contre les épaules une percussion insupportable à la longue; aussi est-il presque impossible de courir pendant quelque temps en traînant une voiture ainsi attelée. Sur un pavé inégal, la marche lente suffit pour produire un effet analogue.

Lorsqu'on observe une voiture attelée d'un cheval qui trotte, on constate les mêmes tensions brusques des traits, ce qui prouve que l'animal subit également des commotions intermittentes.

L'existence de ces chocs étant constatée, nous avons cherché à les amortir en transformant cette traction intermittente en une traction plus uniforme. La mécanique résout à chaque instant des problèmes de ce genre, au moyen d'intermédiaires élastiques placés entre la force motrice intermittente et les résistances à vaincre. C'est ainsi que dans la pompe à incendies la saccade du coup de piston disparaît, transformée, par un réservoir à air, en une pression constante qui donne au jet de l'eau une vitesse uniforme. Sur les chemins de fer, les wagons sont reliés entre eux au moyens de pièces élastiques qui suppriment, en partie, la brutalité des secousses au moment de la mise en marche.

Je plaçai donc un ressort élastique entre la bricole et la voiture, et m'y attelant pour la traîner, je constatai la disparition presque complète des chocs qui se produisent dans la marche sur un pavé inégal, et dans la course, sur les terrains unis eux-mêmes.

Non content de mon appréciation, je soumis à cette épreuve

différentes personnes qui toutes furent frappées du même résultat.

Ces expériences prouvent déjà qu'avec cette modification dans l'attelage, on arrive à soulager beaucoup l'homme ou l'animal qui traîne un fardeau.

Plaçons-nous maintenant à un autre point de vue, et voyons si l'emploi de ce ressort élastique accroît en effet le rendement du travail des moteurs animés. Deux points distincts sont à considérer.

1° La production du travail par l'appareil musculaire;

2° L'utilisation du travail produit.

De la destruction du travail musculaire par les chocs.

Il n'y a plus lieu de reproduire ici la description des phénomènes intimes qui se passent à l'intérieur d'un muscle en action, mais il faut rappeler que ce muscle effectue, dans un effort *statique*, les mêmes actes intérieurs que dans le travail *dynamique*. Dans les deux cas, des ondes musculaires se forment; mais tandis que dans le travail *dynamique* ces ondes produisent un raccourcissement réel du muscle, elles ne font que l'échauffer pendant l'effort *statique* et mettre ce muscle dans un état de tension sans effet utile. C'est ainsi que nous pouvons commander à nos muscles un effort de traction de 100 kilogr., et dépenser inutilement cet effort, si l'obstacle à surmonter représente 110 kilogr. J'ai dit ailleurs (1) comment la vitesse qu'on imprime à une masse exige un effort proportionnel au carré de cette vitesse même. Telle force qui serait capable de soulever un certain poids, à une certaine hauteur, dans un temps donné, sera incapable d'effectuer ce travail entier dans un temps moins long. Or, l'interposition d'une transmission élastique entre le moteur et la masse à mouvoir a précisément pour effet d'accroître la durée d'application de la force motrice, et de rendre ainsi utilisable un effort qui, brusquement produit, ne se fût pas transformé en travail.

Lorsque notre volonté commande à nos muscles un acte des-

(1) *Du mouvement dans les fonctions de la vie*, p. 457.

tiné à imprimer au corps une certaine vitesse, l'énergie de l'effort est réglée sur les résistances actuelles ; s'il se produit un accroissement subit de ces résistances, ce changement met l'effort musculaire hors de proportion avec le nouveau travail qu'il doit effectuer, et le place dans les conditions d'utilisation incomplète dont nous venons de parler.

La nature a recours précisément à l'élasticité pour utiliser, à l'intérieur des muscles, les forces motrices qui s'y engendrent presque instantanément par des espèces d'explosions dont la durée est à peine de 3 à 4 centièmes de seconde.

Placer une élasticité entre nos efforts musculaires et les masses qu'ils doivent mouvoir, c'est imiter le procédé de la nature pour la meilleure utilisation de l'action essentiellement intermittente des muscles.

De la meilleure utilisation du travail extérieur des moteurs intermittents.

Des considérations du même ordre que celles que nous venons d'exposer portent à croire que le travail extérieur fourni par des moteurs intermittents se trouve dans de mauvaises conditions pour être entièrement utilisé. Ici la démonstration n'emprunte plus rien à la physiologie ; elle est du ressort de la mécanique pure.

Chaque fois que notre corps animé de vitesse vient se heurter par l'intermédiaire de la courroie rigide contre la résistance de la voiture, une force vive empruntée à notre propre masse tend à se communiquer à la masse à déplacer. Or, il est facile de démontrer, par une expérience très-simple, que la totalité du travail qui correspond à cette force vive ne sera pas employée au déplacement du véhicule.

La figure 1 va nous montrer comment une force vive s'éteint dans un choc, tandis qu'elle se transforme en travail lorsque le choc est supprimé.

Sur un support solidement établi est adapté une sorte de fléau de balance dont l'un des bras porte une sphère du poids de 100 grammes, tandis qu'au bout de l'autre bras une petite sphère pesant 10 grammes est suspendue par un fil solide

d'un mètre de longueur. Pour que le fléau de balance se trouve horizontal, malgré la charge inégale de ses deux bras, on a établi sur son axe un encliquetage qui permet les mouvements d'ascension de la sphère, mais qui en empêche la descente. Une aiguille indicatrice parcourant un quart de cercle sert à mesurer exactement les déviations du fléau.

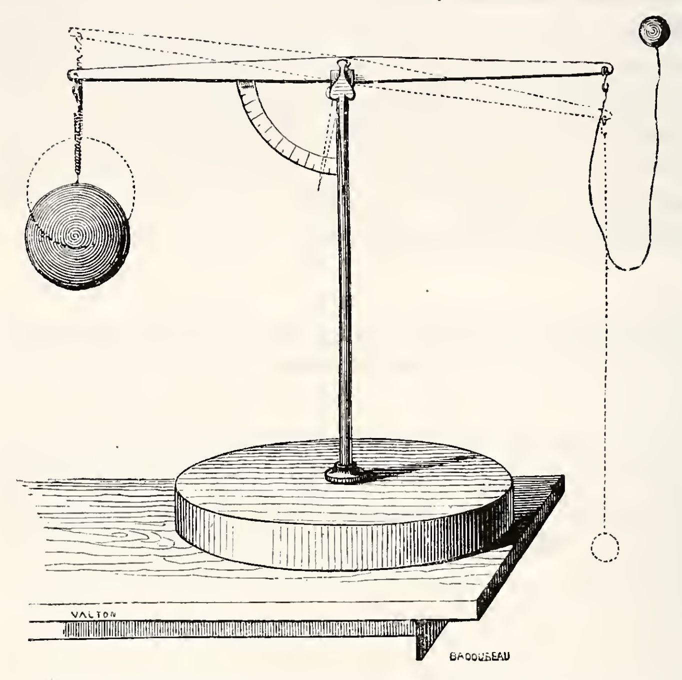


Fig. 1.— Appareil destiné à montrer qu'une *force vive*, directement appliquée au déplacement d'une masse, s'éteint dans un choc, tandis que la même force, transmise par un intermédiaire élastique, peut effectuer du travail. (Figure empruntée à l'ouvrage intitulé : *Du Mouvement dans les fonctions de la vie*, 1868).

Pour imiter les forces vives intermittentes qui, dans la traction des voitures, tendent les traits d'une manière plus ou moins brusque, je laisse tomber, d'une certaine hauteur, la petite sphère qui est suspendue à l'un des bras du fléau, et j'utilise la force vive développée au moment de la tension du fil, à soulever la sphère pesante suspendue à l'autre bras.

Si l'on prend pour la suspension de la sphère pesante un fil aussi peu extensible que possible, de façon qu'il n'y ait aucune élasticité intermédiaire entre le corps qui perdra sa

vitesse et le corps qui devrait être déplacé, on s'aperçoit, au moment où la balle s'arrête, qu'un choc sonore se produit, que tout l'appareil s'ébranle et vibre, mais que la sphère ne s'élève point.

Suspendons, au contraire, la sphère à l'extrémité d'un ressort élastique ou d'un fil de caoutchouc et renouvelons l'expérience. Au moment où la balle, arrivée à la fin de sa course, produit la tension du fil, on voit le fléau s'incliner brusquement et faire un angle plus ou moins ouvert avec sa direction primitive. Ce déplacement s'effectue grâce à l'élasticité du ressort qui suspend la sphère pesante ; celle-ci ne subit aucun déplacement dans le premier instant, mais sous la traction du ressort qui vient d'être distendu, on la voit se soulever peu à peu. Il y a donc un travail effectué dans le cas où l'on applique, par l'intermédiaire d'un ressort élastique, une force vive qui, directement appliquée tout à l'heure, se détruisait dans un choc.

Cette expérience nous amène à conclure que le ressort élastique, placé entre une voiture et le trait qui lui transmet la force du moteur, doit produire une meilleure utilisation des forces intermittentes appliquées à la déplacer.

Le dynamomètre enregistreur, qui fournit en pareil cas la mesure du travail dépensé, doit prouver l'exactitude de ces prévisions. Il doit montrer qu'avec un intermédiaire élastique on obtient une meilleure utilisation du travail moteur, soit qu'une même dépense de force produise plus d'effet utile, soit que le même effet utile s'obtienne avec une moindre dépense de force.

Le travail utile sera le même dans deux expériences comparatives, lorsque la voiture aura parcouru le même espace, dans le même temps, sur la même route. *Le travail moteur* sera le même lorsque, sur les tracés du dynamomètre, les aires comprises entre les courbes enregistrées et l'axe de leurs abcisses seront égales.

J'ai commencé par appliquer le dynamomètre enrégistreur du général Morin à une voiture que je faisais traîner tantôt avec une courroie rigide, tantôt par l'intermédiaire d'un ressort élastique. D'autre part, un compteur des tours de roues devait permettre de s'assurer que dans l'un et l'autre cas la

traction se faisait avec la même vitesse. Mais je m'aperçus que l'instrument, formé d'un ressort d'acier dont la flexion est proportionnelle aux efforts exercés, faisait bénéficier la voiture qui en était munie des effets de l'intermédiaire élastique, et que je ne pourrais, avec cet appareil, faire les expériences comparatives que je me proposais. Je construisis un autre dynamomètre dont la course, très-petite, ne laissait agir l'élasticité que d'une manière négligeable, puis j'ajoutai à cet appareil des organes amplificateurs du mouvement, afin que les indications fussent d'une lecture facile ; je recourus ensuite à la photographie pour obtenir des épreuves de dimensions plus grandes encore. Enfin, je mesurai les surfaces des tracés obtenus comparativement avec les deux modes de traction, et constatai *que pour des chemins égaux parcourus en des temps égaux*, c'est-à-dire pour un même travail utile effectué, *la traction élastique consomme moins de travail moteur.* Voici du reste la description des appareils que j'ai employés, et les tracés qu'ils m'ont fournis.

Dynamographe ou dynamomètre inscripteur. — L'appareil du général Morin, d'un emploi si avantageux toutes les fois qu'il s'agit de déterminer les variations du travail résistant quand le travail moteur reste le même, ne saurait s'appliquer à résoudre le problème inverse que je me proposais. Il fallait, dans la construction d'un nouvel appareil, supprimer autant que possible l'action de l'élasticité qui transforme un choc brusque en un effort plus prolongé ; en même temps, je devais conserver au dynamomètre une sensibilité suffisante pour produire, dans la courbe tracée, un déplacement appréciable et proportionnel aux efforts déployés.

La figure 2 représente la modification que j'ai adoptée.

Une forte monture de fer est munie de deux anneaux, dont l'un A se fixe à la voiture et l'autre B à la courroie qui sert pour la traction. Ce dernier prolonge la tige d'un piston maintenu en équilibre entre deux ressorts-boudins, dont l'un plus résistant, supporte tout l'effort de la traction. De l'autre côté du piston, la tige se continue jusqu'à une membrane de caoutchouc qui ferme une caisse métallique.

Toute traction sur la tige du dynamomètre attire la membrane élastique et raréfie l'air de la caisse. Des alternatives

de raréfaction et de compression de l'air contenu dans cette caisse se produisent suivant que la force de traction augmente ou diminue; cela donne naissance à une soufflerie qui se transmet à travers un tube de caoutchouc, jusqu'à un appareil chargé de l'inscrire sur un cylindre tournant.

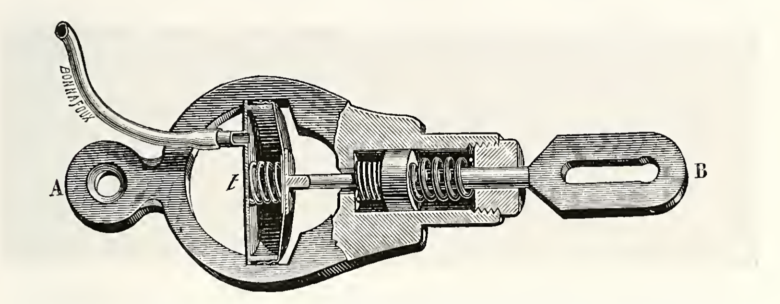


Fig. 2. — Dynamographe ou dynamomètre inscripteur transmettant à distance les indications des efforts de traction.

Dans le tracé qu'on obtient ainsi, la courbe s'élève d'autant plus haut que l'effort de traction développé est plus énergique. On gradue l'instrument en le soumettant à des tractions connues et l'on construit l'échelle qui sert à en évaluer les indications. Sur cette échelle, les hauteurs sont très-sensiblement proportionnelles aux poids employés à produire la traction, quand l'effort varie entre 1 et 36 kilogrammes.

Expériences sur la traction d'une voiture à bras. — Pour apprécier les avantages de l'emploi d'un trait élastique au lieu d'une courroie rigide, il faut faire deux expériences comparatives, en mesurant à la fois le travail moteur dépensé et le travail utile produit.

Or, on peut dire que le travail utile a été le même dans deux cas, où une voiture a parcouru, sur la même route, des espaces égaux avec des vitesses égales. Si l'on démontre que dans l'un des cas, le dynamomètre traceur accuse moins de travail dépensé que dans l'autre, on aura prouvé que l'un des modes d'attelage est préférable à l'autre.

Les figures 3 et 4 sont les tracés fournis par deux expériences comparatives. La vitesse était la même dans les deux cas; on s'en assure au moyen d'un appareil assez simple qui trace un signal à chacun des tours de roue; le

nombre de ces signaux est le même sur une longueur donnée; la vitesse est donc égale de part et d'autre. Quant au travail moteur dépensé, sa mesure correspond, pour chacun des tracés, à la surface comprise entre la courbe et l'axe des abscisses. Cette surface est d'environ 26 0/0 moins grande

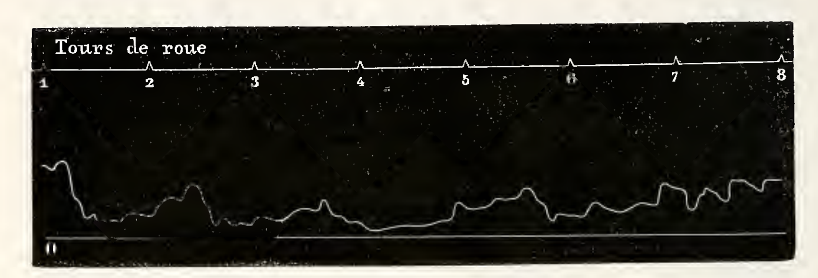


Fig. 3. — Tracé du dynamographe pour une voiture tirée avec un intermédiaire élastique (Surface au planimètre de Amsler, 53).

dans la figure 3 que dans la figure 4. Il y a donc eu pour ce cas 26 0/0 de travail économisé (1). Il s'agissait, il est vrai, d'une allure assez rapide ; la voiture était traînée, au pas gymnastique, sur un terrain parfaitement uni (route asphaltée à

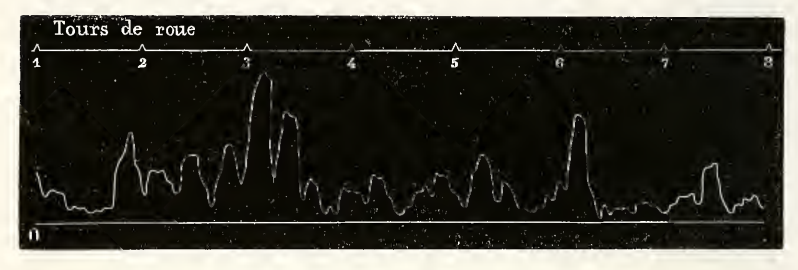


Fig. 4. — Tracés du dynamographe pour une voiture à bras traînée avec un trait rigide (Surface au planimètre de Amsler, 72).

l'extrémité du jardin du Luxembourg). La différence eût été moindre avec une allure moins vive. Mais, d'autre part, sur

(1) Cette évaluation a été obtenue en grandissant les tracés ci-dessus par la projection de leurs clichés photographiques ; en traçant les contours ainsi amplifiés 20 fois et en les découpant suivant toutes leurs sinuosités; enfin en pesant suivant la méthode de Galilée, les papiers ainsi découpés. Le rapport des poids est sensiblement celui des aires et sert à mesurer les rapports du travail dépensé. — Les mêmes tracés mesurés au planimètre de Amsler donnent une différence un peu moindre qui réduirait l'économie de travail à 24 0/0.

un mauvais pavé, on trouve un écart plus grand encore entre les résultats fournis par les deux modes de traction. En somme, sur un nombre considérable d'expériences, j'ai toujours constaté l'avantage de la traction élastique au point de vue du rendement. Les mêmes résultats furent obtenus pour des voitures traînées par des chevaux. Si l'on joint à cet avantage celui qui consiste dans l'amortissement des chocs douloureux qu'une courroie rigide transmet aux épaules de l'homme ou de l'animal qui traîne un fardeau, on verra que le mode de traction au moyen d'un intermédiaire élastique est extrêmement avantageux.

Quant à l'instrument que l'on doit employer pour cela, il peut être fort simple et peu coûteux, soit qu'on le construise avec des ressorts-boudins de forces calculées (1), soit qu'on emploie des lanières de caoutchouc. L'économie du travail et la diminution de la fatigue qu'on obtient à l'aide de ce moyen de traction me semble constituer une importante application de la physiologie à l'amélioration du sort de l'homme et des animaux.

En exécutant les expériences qui viennent d'être rapportées, j'avais suivi, comme on a pu le voir, l'enchaînement naturel d'une série de recherches dont le point de départ était essentiellement physiologique. M'étais-je rencontré avec d'autres expérimentateurs? C'est ce que j'ai voulu rechercher.

Or, j'ai pu me convaincre que maintes fois, et à différentes époques, l'emploi de ressorts élastiques pour la traction a été conseillé et employé, soit pour le halage des bateaux sur les canaux, soit pour leur remorquage dans les ports; ailleurs, sur les voies ferrées et sur les routes. Il est même d'usage, dans certaines localités, d'attacher les traits à un ressort pareil à ceux qui servent à la suspension des voitures. Mais, en

(1) La disposition qui m'a semblé la plus avantageuse consiste en une série de ressorts-boudins de forces croissantes introduits dans un tube de cuivre où un piston les comprime comme dans le dynamographe (fig. 2). Suivant l'effort dépensé on applique ainsi des forces élastiques variables. Supposons, par exemple, que le ressort le plus faible agisse entre 5 et 10 kilogr. de traction; pour des efforts plus grands, ce premier ressort sera entièrement revenu sur lui-même, et le deuxième entrera en action jusqu'à 15 kilogr.; de 15 à 20, ce sera un troisième ressort qui fonctionnera, et ainsi jusqu'au dernier.

recherchant dans quel but l'emploi des ressorts élastiques pour la traction avait été conseillé, je n'ai reconnu que l'intention d'amortir les chocs, afin d'empêcher leur réaction pénible pour les animaux ou leur effet destructeur du matériel. Nulle part, je n'avais trouvé mention d'expériences prouvant que l'utilisation du travail fût meilleure et son rendement plus grand avec les traits élastiques.

Mais, dans ces derniers temps, on m'a donné connaissance d'un mémoire publié par M. Ferhmann, ingénieur à Berlin, qui s'est placé au point de vue du rendement favorable que procure la traction au moyen d'intermédiaires élastiques.

Voici la traduction de ce travail, que je dois à l'obligeance de M. André Sanson.

Station d'épreuve de Halle, pour les machines et les outils agricoles. Fehrmann's Pferdeschoner de Fehrmann et Schwanck, *de Berlin.*

Cet appareil, inventé depuis quelques mois par l'ingénieur Fehrmann, de Postdam, consiste en un certain nombre d'anneaux de caoutchouc, séparés par des disques de tôle, qui sont placés dans une boîte cylindrique en fer et pressés les uns contre les autres par une tige passant à travers les anneaux et fixée au dernier disque dès qu'on fixe la boîte et qu'on en tire la tige. La boîte est pourvue d'un anneau et la tige d'un crochet, de telle sorte qu'on peut attacher facilement partout l'appareil, qui a environ 30 centimètres de long.

L'inventeur place cet appareil, comme *ménager* du cheval, entre les traits et le palonnier, de sorte qu'on emploie pour chaque cheval deux ménagers.

Cette union élastique entre le cheval et le palonnier ne doit pas seulement, d'après les vues de l'inventeur, faciliter essentiellement le tirage de la voiture, mais encore rompre les chocs dans la marche sur les voies rabotteuses, et diminuer par là peut-être aussi la force de traction.

Le démarrage des voitures chargées exige une force beaucoup plus grande que le tirage quand la voiture est déjà en marche. Cette force de traction devient d'autant plus grande que la voiture passe plus rapidement du repos à la vitesse de marche, et d'après les mesures obtenues, elle s'élève facilement jusqu'à deux et trois fois celle qui est plus tard nécessaire.

Avec de lourdes charges, les chevaux qui veulent presque toujours tirer très-rapidement ne peuvent pas déployer la grande force nécessaire, et pour ce motif ils cherchent à agir par secousses sur la voiture en se jetant dans le harnais, mais avec cela, comme dans tous les chocs, ils consomment en pure perte une grande partie du travail total, et ils se ruinent ainsi que le harnais et la voiture. S'il était pos-

sible que les chevaux tirassent aussi lentement, avec autant de calme et de régularité que les bœufs, ils pourraient ainsi mettre en mouvement, par pure pression, maintes charges qu'ils cherchent à vaincre seulement par secousses. Le « Pferdeschoner » fournit pour cela un moyen, parce que, avant le tirage qui doit entraîner la charge, il exige pour la compression une force d'abord tout à fait minime, puis augmentant progressivement, qui oblige le cheval à modérer peu à peu son impétuosité, de telle sorte que dans le tirage la charge exerce déjà une très-grande pression avec une faible vitesse, et il peut alors tirer plus facilement qu'avec sa grande impétuosité ordinaire.

La principale action de l'appareil sur le cheval est toutefois morale dans la traction, parce que, au premier moment, celui-ci ressent un mouvement qui lui donne conscience qu'il est capable de suffire à sa charge et l'entraîne à employer ses forces les plus extrêmes avec calme, là où il aurait cherché, en l'absence de l'appareil, à vaincre les résistances seulement par des à-coups.

Dans la marche même, la force de traction est très-variable sur toutes les voies, parce qu'elle consiste en élévations et abaissements, qui se traduisent dans le tirage comme de petites montées et descentes, qui, par conséquent retardent le mouvement de la voiture dans un instant et l'accélèrent aussitôt après. Ces variations rapides de la force de traction se succédant ainsi exercent sur le cheval, dans le cas d'attelage non élastique, des secousses continuelles qui, non-seulement s'ajoutent aux pertes de travail, mais encore fatiguent plus le cheval que quand il exerce la même traction avec une vitesse régulière.

Par ce fait que le *Pferdeschoner* rompt les secousses, cessent avec lui ces pertes de travail accumulées; en outre, la force de traction moyenne devient plus faible qu'avec le mode d'attelage ordinaire.

Les avantages du *Pferdeschoner* semblent être les suivants :

1) Tirage plus facile de la voiture;

2) Chocs faibles dans la marche, et par là moindre fatigue du cheval;

3) Force de traction moindre.

La tâche de la station d'épreuve des machines est de montrer, par des recherches directes, l'existence de ces avantages et autant que possible d'évaluer en chiffres l'étendue de l'épargne, afin qu'on puisse, d'après les résultats numériques, juger si l'emploi du Pferdeschoner est à recommander.

En vue de ce but il a été fait onze expériences, qui devaient montrer l'influence des diverses qualités de sols sur l'appareil. Dans chaque expérience a été d'abord déterminé le tirage d'une voiture attelée d'un seul cheval, avec un dynamomètre enregistreur; puis, entre le dynamomètre et la voiture, on a introduit un Pferdeschoner ; on a suivi au retour exactement la même voie et on a mesuré de nouveau le tirage.

Le dynamomètre enregistreur indiquait le tirage et ses variations pour chaque point de la voie, de telle sorte qu'on pouvait obtenir de ses indications toutes les valeurs désirées et les comparer comme elles se présentent dans le tableau suivant.

Résultats des expériences exécutées à la station d'épreuve des machines agricoles et outils de Halle en Saxe, sur l'appareil (Pferdeschoner) de Fehrmann et Schwanck, de Berlin.

NUMÉROS de l'expérience.	DATES.	QUALITÉ de la voie.	COULEUR de l'appareil.	CHEMIN parcouru en mètres.	CHARGE (y compris la voiture) en kilogrammes.	FORCE DE TRACTION dans le tirage		FORCE DE TRACTION moyenne		VARIATIONS de la force de traction	
						en kilogrammes.	avec l'appareil, en tant pour 100 de la force de traction sans appareil.	en kilogrammes.	avec l'appareil, en tant pour 100 de la force de traction sans appareil.	en kilogrammes.	avec l'appareil, en tant pour 100 des variations sans appareil.
1	18 Mai	Pavé.	Bleue.	60	1150	183 270	68	44 93	47	88 155	57
2	23 —	Pavé.	Noire.	190	1200	165 195	85	67 92	73	103 153	67
3	23 —	Gazon brut.	Bleue.	500	1100	137 150	91	78 74	107	80 143	56
4	23 —	Gazon uni.	Noire.	150	1200	110 132	77	29 56	52	30 48	
5	29 —	Pavé.	Noire.	170	1000	103 118	87	65 69	94	64 71	90
6	29 —	Gazon uni	Noire.	300	700	125 127	98	30 35	86	39 60	65
7	29 —	Pavé.	Noire.	178	700	120 155	77	50 44	114	51 78	63
8	12 —	Pavé.	Bleue.	60	1550	180 230	78	45 60	75	90 120	75
9	18 —	Pavé.	Bleue.	60	1150	183 390	47	60 140	43	120 280	43
10	23 —	Gazon brut.	Bleue.	500	950	160 172	93	72 81	89	143 162	88
11	23 —	Gazon brut.	Bleue.	500	950	175 135	140	75 67	112	120 113	106
						Force de traction dans le tirage en tant pour 100 de la force sans appareil.	Force de traction moyenne en tant pour 100 de la force me sans appareil.	Variations en tant pour 100 des variations sans appareil.			
					Au pas....	83	82	66			
					Au trot....	89	80	78			

Sur ce tableau on doit remarquer encore que les expériences du 12 et du 18 mai ont été faites avec une grande voiture ordinaire, dans la cour pavée de la sucrerie, mais les expériences du 23 et du 29 mai, avec une voiture sans ressorts, plus légère, à un seul cheval, en partie sur une route pavée montante, en partie sur une place à exercice.

Il a été employé d'abord un appareil plus faible (bleu) et puis un plus fort (noir).

Dans les résultats de chaque expérience sont toujours présentées dans la première rangée les valeurs pour la marche avec appareil, et dans la seconde celles pour la marche sans appareil.

Les expériences n°s 1 à 7 ont été faites au pas; celles du n° 8 au n° 11, au trot.

Si l'on extrait du tableau les valeurs moyennes pour le trot et le pas, qui seulement peuvent être significatives à cause des nombreuses circonstances ayant de l'influence sur les expériences, on a ainsi pour la traction avec l'appareil :

	Traction pour le tirage en centièmes de la traction sans appareil.	Traction moyenne en centièmes de la traction moyenne sans appareil.	Variations en centièmes des variations sans appareil.
Au pas	83	82	66
Au trot.	89	80	78

D'après ces expériences, les chevaux tirent par conséquent avec l'appareil de 11 à 17 0/0 plus facilement; leur traction moyenne est de 18 à 20 0/0 plus faible et les à-coups s'amoindrissent de 22 à 33 0/0, de sorte que les chevaux sont de tous les côtés essentiellement épargnés; il est encore à remarquer que toutes les expériences ont été faites en montant, sur le pavé, par conséquent qu'elles sont moins en faveur de l'appareil que des expériences en plaine.

Sur la durée de l'appareil, il n'est, quant à présent, pas encore possible de porter un jugement. Les anneaux de caoutchouc doivent être remplacés. Leur durée est vraisemblablement de plus de deux ans, parce que la fabrique garantit ses appareils pour ce temps.

Pour les voitures à fortes charges, les appareils coûtent 10 marcs la pièce, par conséquent, pour une paire de chevaux, 40 marcs.

Le Pferdeschoner est encore dans sa période de développement; il faut admettre, par conséquent, qu'il donnera encore des résultats meilleurs et qu'il méritera de plus en plus son nom.

Dès à présent, il est à recommander sans restriction, parce qu'avec lui les chevaux peuvent non-seulement tirer et marcher plus facilement, mais encore aussi être garantis contre les secousses sur les voies inégales et tirer, dans le cas de nécessité, des charges plus lourdes.

JUL. KÜHN, président, C. FREYTAG, BOLTE, A. GNEIST, WUST.

Extrait du *Früling's Landw. Zeitung.* — Octobre 1874

Les conclusions de ce mémoire sont, comme on le voit, identiques à celles que j'ai tirées de mes expériences. Les chiffres qui y sont donnés s'accordent avec les miens. Ils présentent parfois des écarts assez grands dans des expériences où les conditions étaient les mêmes, mais, en l'absence de renseignements sur la nature des appareils employés pour l'estimation des vitesses et pour celle du travail effectué, on ne saurait discuter la précision de ces résultats.

De nouvelles recherches sont encore nécessaires, pour déterminer les conditions dans lesquelles la traction élastique donnera le maximum de ses avantages. Mais, dès à présent, l'avantage de la traction élastique semble démontré.

Bien que les questions de priorité me paraissent être, sur ce sujet, d'une importance secondaire, j'ai tenu à signaler, en même temps que les résultats publiés par M. Ferhmann, ceux que j'ai obtenus moi-même, avec la date de publication de chacun d'eux, afin de bien établir que dans la conduite de mes recherches, je n'ai pu être influencé par le travail de l'ingénieur allemand.

II.

MÉMOIRE SUR LA PULSATION DU CŒUR.

I. — De la pulsation du cœur.

Valeur clinique de la pulsation du cœur. — Fausses idées sur la nature de ce phénomène. — Tracés graphiques de la pulsation du cœur ; multiplicité des détails qu'ils renferment. — Importance de leur interprétation fidèle. — Cardiographie physiologique sur les grands animaux ; analyse des tracés ; changements de volume et changements de consistance des ventricules. — Un tracé de la pulsation du cœur renseigne sur la manière dont cet organe fonctionne.

Jusqu'ici les médecins n'ont étudié la pulsation du cœur que d'une manière superficielle et n'ont pas tiré de ce signe extérieur de la fonction cardiaque tous les renseignements qu'il peut fournir. La raison du peu de parti qu'on a tiré de cet important phénomène est d'abord, et surtout, l'incertitude qui a régné pendant longtemps sur la cause qui lui donne naissance et sur le moment de la révolution cardiaque auquel il correspond. Beaucoup d'auteurs, il est vrai, professaient que le *choc* du cœur se produit au moment de la systole ventriculaire, mais quelques autres le plaçaient au moment de la diastole.

Les expériences de cardiographie physiologique semblent avoir contribué à faire cesser un tel désaccord. Mais le mot de *choc* du cœur, dont les auteurs se servent encore à peu

près tous, montre bien que la nature de ce phénomène est mal connue. Un choc, en effet, est un acte très-bref, presque instantané, tandis que la pulsation cardiaque a une durée très-notable. D'ailleurs, il est presque superflu de rappeler, qu'emprisonné dans la cavité du péricarde, le cœur ne peut s'éloigner de la paroi thoracique pour venir la heurter à chacune de ses systoles et que, par conséquent, il ne peut y avoir choc à proprement parler.



Fig. 5. — Tracé de la pulsation du cœur chez l'homme à l'état normal. — Les différences de formes des pulsations tiennent à des influences respiratoires.

Si, négligeant le mécanisme de la pulsation cardiaque, on ne s'occupe que de son moment d'apparition, ce phénomène n'a que la valeur d'*un point de repère* pour l'auscultation du cœur. Au médecin qui ausculte, il sert à distinguer le premier bruit du second ; il annonce le début de la systole des ventricules, de même que la clôture des valvules sigmoïdes en



Fig. 6. — Pulsation du cœur d'un homme pendant une affection fébrile. — Les grandes ondulations du tracé sont dues aux influences de la respiration. (Cette figure est reproduite par l'héliogravure.)

annonce la fin. Quant aux médecins qui ont cru pouvoir mesurer l'énergie du cœur à celle de la pulsation cardiaque, ils ont

émis une hypothèse que l'expérimentation physiologique est loin de justifier, ainsi qu'on le verra plus loin. En somme, le rôle de point de repère dans l'auscultation est le seul que la pulsation du cœur joue réellement aujourd'hui en clinique.

Toute autre est la valeur que doit prendre ce signe si l'on emploie pour l'étudier les appareils inscripteurs.

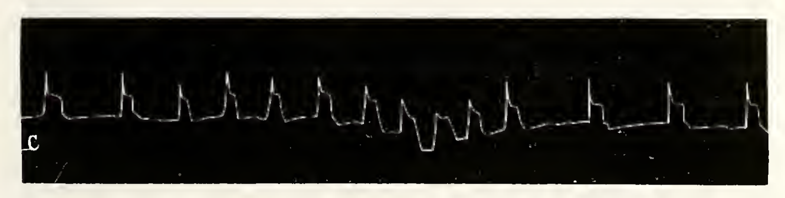


Fig. 7. — Pulsation du cœur du chien. — On remarque les influences de la respiration sur le rhythme du cœur.

La variété des types que fournit le tracé de la pulsation du cœur, la richesse des détails qu'il présente dans certains cas, montrent que, dans la pulsation du cœur, on peut, on doit trouver l'expression de bien des phénomènes qui se passent dans les cavités de cet organe; peut-être même y lira-t-on tout ce qui se passe dans le cœur: mouvement du liquide sanguin, action des muscles, jeu des valvules, etc.

Qu'on examine une série de tracés recueillis sur des sujets différents, ou sur un même sujet dans des conditions variées. Quelle diversité! et que faut-il pour que cette diversité même nous apprenne en quoi variait la fonction du cœur lorsqu'elle donnait des tracés si dissemblables? Connaître à quoi tient chacun des détails de la courbe ainsi recueillie, et savoir comment chacun d'eux se modifie quand la fonction varie dans un sens connu.

Le tracé de la pulsation du cœur, plus accidenté que celui du pouls artériel, sera aussi plus riche en enseignements quand on saura le lire et l'interpréter avec certitude.

Cette tâche a été grandement facilitée par les expériences faites sur les animaux. Dans des recherches publiées en 1861, avec le professeur Chauveau, nous avons montré que les ventricules viennent presser contre la paroi thoracique pendant leur période de systole, et que cette pression dure autant que la systole elle-même.

Je n'aurai pas à rappeler avec détails la disposition des appareils qui nous fournirent, sous forme de tracés, l'expression des différents actes qui se produisent dans une révolution du cœur. Ces expériences ont été exposées ailleurs (1) d'une manière complète. Rappelons seulement que nous introduisions par les veines ou par les artères du cou, jusque dans les cavités du cœur, des appareils qui exploraient la pression, à la façon de manomètres très-sensibles ; que chacun de ces explorateurs se rendait à un appareil inscripteur qui accusait par une ascension de la courbe les élévations, et par une descente les diminutions de la pression (2).

(1) *Physiol. méd. de la circulation du sang.* 1863. p. 46 et suiv. — *Dictionnaire encyclopédique* des sciences médicales. Art. CARDIOGRAPHIE.

(2) Voici le principe de la transmission des pressions au moyen de tubes à air.

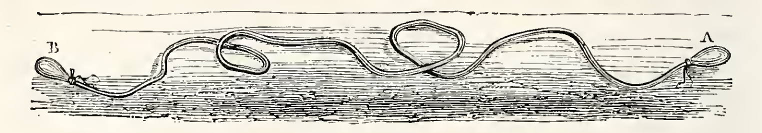


Fig. 8. — Transmission des mouvements par un tube à air.

Soit (fig. 8) deux ampoules de caoutchouc B et A pleines d'air et reliées entre elles par un long tube de caoutchouc. Si l'on comprime l'ampoule B, une partie de l'air qu'elle renferme est expulsé par le tube et passe dans l'ampoule A qui se gonfle. Si la pression cesse, l'air repasse en B et l'ampoule A se dégonfle.

Admettons que l'ampoule B soit introduite dans un ventricule du cœur et que l'ampoule A soit placée sous un levier semblable à celui du sphygmo-

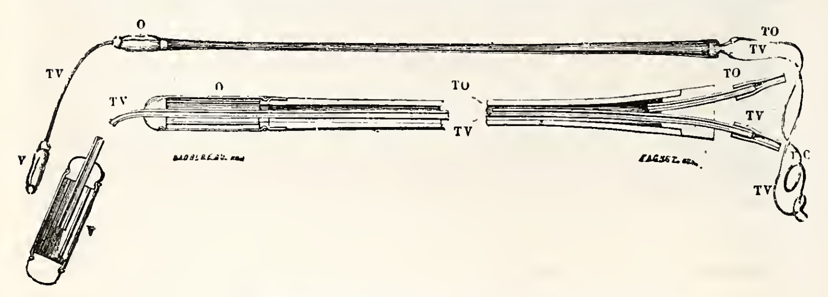


Fig. 9. — Sonde cardiaque droite avec les détails de sa structure.

graphe, les systoles du ventricule seront signalées par l'élévation, et les diastoles par l'abaissement du levier.

Pour s'appliquer facilement aux besoins de la cardiographie, les ampoules

Les différentes pointes écrivantes de ces appareils étant exactement placées les unes au-dessus des autres, signalaient, par des ondulations exactement superposées les unes aux autres, tous les changements de pression qui se faisaient en un même instant dans les différentes cavités du cœur. Enfin, l'un des explorateurs de la pression se trouvait logé dans les parois thoraciques exactement en face des ventricules du cœur, de sorte qu'il inscrivait les changements de volume

initiales et *terminales* ont été modifiées dans leur forme. Les ampoules initiales qui doivent explorer la pression dans l'oreillette et dans le ventricule, ont été disposées sur une sonde à double courant qui s'enfonce par la veine jugulaire, et conduit l'une des ampoules dans l'oreillette, et l'autre dans le ventricule. La fig. 9 représente, dans son ensemble et dans ses détails, la sonde exploratrice des cavités droites.

L'ampoule V, destinée au ventricule droit, communique par son tube TV avec un levier inscripteur. L'ampoule O, destinée à l'oreillette, communique par le conduit extérieur avec le tube TO et un autre levier inscripteur. La sonde s'introduit, par la veine jugulaire du cheval, jusque dans les cavités du cœur droit. La longueur qui sépare les ampoules V et O est telle, que, lorsque V est dans le ventricule, O occupe l'oreillette. Il suffit donc, pour arriver à une bonne position des ampoules, de les enfoncer par la veine jugulaire jusqu'à ce qu'on éprouve une résistance absolue due au contact de l'ampoule V avec le fond du ventricule droit.

Pour explorer la pulsation du cœur, une ampoule pareille à celle des sondes était placée en face du ventricule, dans un espace intercostal.

Chaque *ampoule terminale*, dans le cardiographe, est constituée par une caisse métallique plate T (fig. 10), que ferme supérieurement une membrane élastique. Dans la caisse s'ouvre un tube qui la relie à l'ampoule initiale. Un disque repose sur la membrane et supporte une arête sur laquelle est posé le levier. Chaque fois que l'air est foulé dans la caisse, la membrane se soulève et communique son mouvement au levier *ll* dont l'extrémité *p*, disposée en plume,

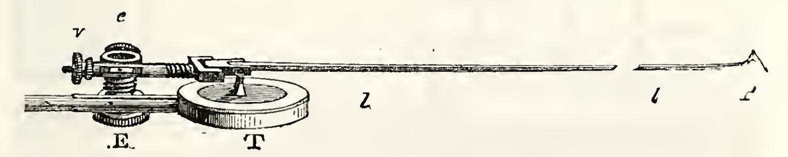


Fig. 10. — Tambour à levier enregistreur.

écrit sur le papier. Toutes les pièces de ce petit appareil sont mobiles et peuvent être déplacées à l'aide des écrous ou vis de rappel E, e, v, ce qui permet de régler à volonté l'amplitude des mouvements du levier, ainsi que la position de la plume. Nous appellerons désormais *tambour à levier* l'appareil qui vient d'être décrit et dont l'emploi se représentera dans d'autres expépériences.

Enfin les trois leviers inscripteurs, placés les uns au-dessus des autres,

et de consistance des ventricules, tandis que les autres explorateurs traçaient les changements de la pression du sang dans les différentes cavités libres de l'organe.

Le *tracé type* qui est reproduit dans la fig. 12 nous parut fournir de précieux renseignements sur la nature de la pulsation du cœur et sur les phénomènes multiples qu'elle traduit au dehors.

La ligne inférieure P est celle qui correspond à la pulsation cardiaque. Pour en comprendre les détails, il faut se reporter à ce qui se passe dans chacune des cavités du cœur.

La ligne supérieure O indique, à chaque instant, l'état de la pression du sang dans l'oreillette ; la ligne moyenne V la pression dans le ventricule.

Dans le tracé de la pulsation, nous voyons sur la verticale ponctuée qui passe par le point A un petit soulèvement qui montre que le ventricule subit un léger gonflement ou une légère augmentation de consistance. Si l'on suit la ligne

comme dans la figure 11, écrivent sur une bande de papier qu'un mouvement d'horlogerie H fait passer au devant des plumes avec une vitesse régulière.

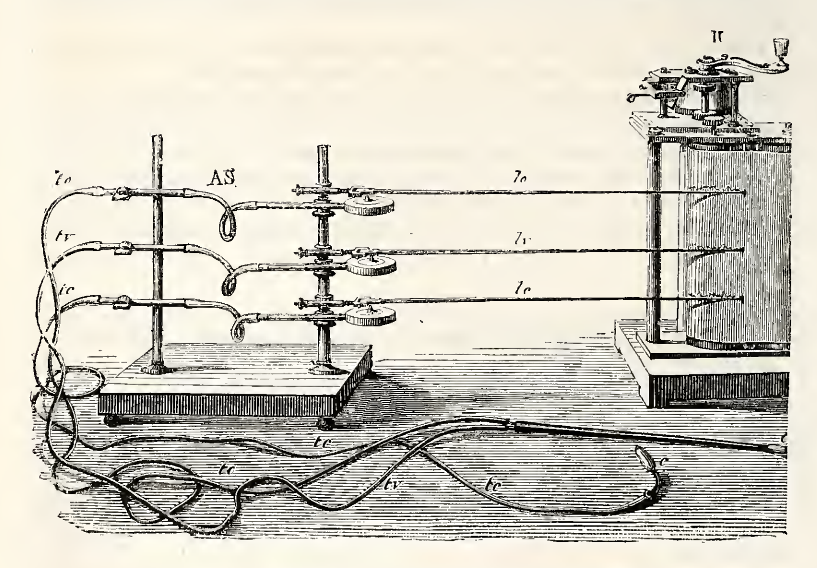


Fig. 11. — Cardiographe physiologique de Chauveau et Marey.

(La longueur des leviers, dans cette figure, a été exagérée; elle doit être moitié moindre.)

verticale A, on voit que, dans le ventricule, elle correspond à un phénomène semblable et que, dans l'oreillette, elle correspond aussi à un accroissement de pression qui se fait d'une manière brusque et assez énergique. Sur le tracé de l'oreillette O, ce soulèvement correspond au maximum de la pression que le sang éprouve dans cette cavité ; c'est évidemment l'instant où s'effectue la systole auriculaire.

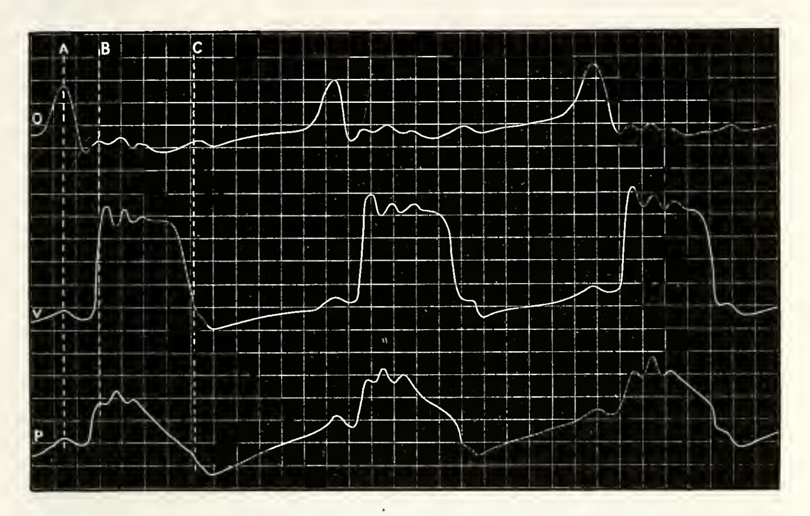


Fig. 12. — Tracé cardiographique recueilli sur le cheval. (Expériences de Chauveau et Marey, 1861.)

Le tracé de la pulsation montre ensuite le soulèvement B brusque et énergique ; il correspond manifestement à ce que les auteurs appellent le *choc* du cœur ; il coïncide avec le début d'un accroissement considérable de la pression dans le ventricule. C'est bien la systole de cette cavité qui commence.

La courbe de la pulsation reste élevée, avec des ondulations légères, tant que dure cette haute pression dans le ventricule ; elle retombe soudainement en C lorsque la systole ventriculaire finit. Quant aux ondulations qui se produisent, au sommet de la période systolique, dans le tracé de la pulsation, nous les avons attribuées à des vibrations de la valvule auriculo-ventriculaire, dont le déplacement amènerait dans la pression intra-ventriculaire des variations légères qui s'éteignent au bout de deux ou trois oscillations.

Si cette hypothèse est vraie, on doit trouver, du côté de l'oreillette, des ondulations semblables du tracé, car les mouvements valvulaires changent la capacité de l'oreillette aussi bien que celle du ventricule. La ligne supérieure O montre qu'en effet les oscillations dont il s'agit retentissent sur la pression du sang dans l'oreillette. Enfin, la même explication s'applique à la petite oscillation qui, dans tous les tracés, se produit au point C, après la fin de la systole ventriculaire. Cette oscillation est due au claquement des valvules sygmoïdes ; elle retentit également dans toutes les cavités du cœur.

Jusqu'ici nous n'avons encore, dans le tracé de la pulsation du cœur, que le signal des systoles de l'oreillette et du ventricule, avec la mesure de la durée de chacune d'elles et des intervalles qui séparent les divers éléments d'une révolution cardiaque. Le tracé peut nous fournir des renseignements plus importants encore : il nous montrera la manière dont le cœur se vide et dont il se remplit.

Les explorateurs placés dans les cavités du cœur nous fournissent exclusivement la mesure des changements qu'éprouve la pression du sang à l'intérieur de chacune d'elles ; ils mesurent l'effort que l'oreillette ou le ventricule exécute pour comprimer le sang qu'ils contiennent et pour l'expulser par les orifices du cœur. Mais ces changements de pression ne nous indiquent point si ces efforts ont été efficaces, s'il est sorti plus ou moins de sang pendant l'acte systolique. L'explorateur de la pulsation cardiaque est placé dans des conditions favorables pour fournir ce dernier renseignement.

En effet, cet appareil consiste en une ampoule élastique pleine d'air mise en communication, à l'aide d'un tube, avec l'appareil inscripteur. La compression de cette ampoule, quelle que soit la cause qui la produise, se traduit par le soulèvement de la courbe tracée. Or, par la position qu'elle occupe entre la surface extérieure du ventricule et les parois thoraciques, l'ampoule exploratrice de la pulsation cardiaque peut être comprimée par deux sortes d'influences : par les changements de consistance et par les changements de volume du cœur.

C'est ici qu'il devient nécessaire d'entrer dans des explications détaillées.

Les ventricules changent forcément de consistance suivant l'état de relâchement ou de resserrement de leurs parois. La pression augmentée ou diminuée qu'y subit le liquide sanguin se traduit par des alternatives de dureté ou de mollesse. Qu'on imagine une vessie à demi remplie d'eau ; elle sera flasque et dépressible. Qu'on la place, au contraire, dans un nouet de linge bien serré, elle deviendra globuleuse et dure, résistant à toute pression qui tendrait à la déformer. Bien plus, si avant de serrer le nouet on exerçait sur cette vessie une pression avec le doigt, celui-ci s'enfoncerait aisément en déprimant les parois ; mais au moment où le nouet est serré, on peut voir le doigt repoussé et la fossette qu'il formait s'effacer avec brusquerie. De pareils changements se produisent dans la consistance des ventricules du cœur. Ces organes, en contact avec les parois thoraciques, se moulent contre elles pendant qu'ils sont relâchés. Ils présentent alors à leur surface une sorte de facette aplatie ; mais quand, par leur systole, ils durcissent et deviennent globuleux, ils pressent énergiquement contre le point du thorax qui est en contact avec leur surface. L'ampoule exploratrice interposée au cœur et à la paroi subit donc, de ce chef, des pressions alternativement fortes et faibles.

Mais il est une autre influence qui se fait sentir également sur les parois thoraciques et sur l'explorateur de la pulsation : c'est l'influence des changements de volume des ventricules qui, tour à tour, se vident ou se remplissent.

La systole des muscles ventriculaires, en admettant que les orifices du cœur fussent fermés et que le sang n'en pût sortir, se traduirait encore à l'extérieur par des changements de dureté de l'organe, comme elle se traduirait au dedans par des changements de la pression du sang ; mais le volume des ventricules resterait invariable. Dans les conditions physiologiques, au contraire, le cœur, en même temps qu'il se durcit, se vide d'une partie de son contenu et diminue de volume ; inversement, tandis qu'il se ramollit par le relâchement de ses parois, il grossit par l'abord du sang qui coule de l'oreillette, même avant la systole de cette cavité. A égale consistance, la

masse ventriculaire presse plus ou moins contre les organes voisins, suivant qu'elle s'emplit ou se vide. Or, ces changements de la pression que subira l'ampoule exploratrice mise au contact du cœur sont l'inverse de ceux qu'elle éprouve par suite des changements de consistance de cet organe.

La courbe P, figure 12, traduit ces deux ordres d'influen-

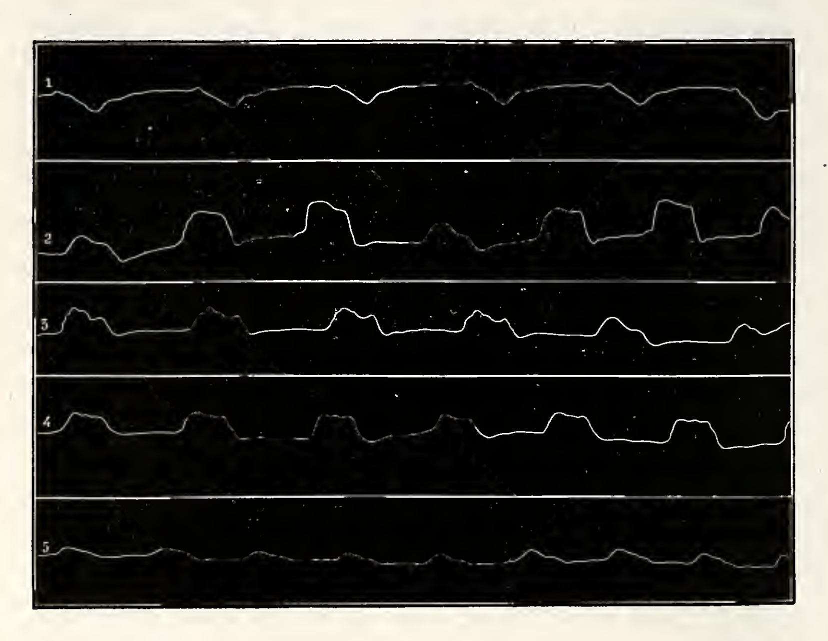


Fig. 13. — Tracés de la pulsation du cœur de l'homme recueillis, à l'aide du sphygmographe, à divers instants de la journée. — Ligne 1, au lit, à peine éveillé. — Ligne 2 *id.* plus éveillé. — Ligne 3, debout en descendant du lit. — Ligne 4 *id.*, quelques instants après. — Ligne 5, après une douche froide.

ces ; c'est pourquoi, dans le soulèvement systolique, de B en C, qui exprime le durcissement du cœur, on voit, en même temps, une inclinaison générale de la courbe dont la pente descendante indique une diminution de volume des ventricules. Inversement, pendant le relâchement ou diastole des ventricules, on observe une pente ascendante du tracé, pente qui correspond à l'accroissement graduel du volume des ventricules par l'abord du sang venu de l'oreillette.

Ainsi, la pulsation cardiaque n'indique pas seulement la succession et la durée des actes qui se passent dans les ven-

tricules du cœur, mais elle en mesure, en quelque sorte, les effets; elle renseigne sur le fonctionnement plus ou moins parfait de la pompe cardiaque, en faisant voir si l'effort systolique est plus ou moins efficace et s'il envoie dans les artères des ondées plus ou moins volumineuses.

L'importance de la pulsation cardiaque est donc extrême, si les interprétations qu'on vient de lire sont justes ; aussi ai-je fait de nombreux essais pour obtenir sur l'homme un tracé fidèle de la pulsation du cœur. Le *sphygmographe* appliqué sur la région précordiale donne des tracés parfois assez nets, fig. 13, mais cet instrument est d'une application difficile ; avec des explorateurs spéciaux on obtient des tracés plus nets. On a déjà pu juger, par les figures 5, 6 et 7, de la diversité que présentent les tracés suivant les variations physiologiques de la circulation.

II. — Choix et contrôle des appareils destinés à inscrire la pulsation du cœur.

Appareil de Buisson ; inconstance de ses indications. — Stéthoscope de Kœnig. — Explorateur à coquille. — Explorateur à tambour. — Appareils inscripteurs portatifs : Polygraphe à cylindre ; polygraphe à bande de papier. — Tambour à levier perfectionné ; diminution des résistances dans le transport du mouvement. — Choix de la vitesse du papier qui reçoit le tracé. — Nécessité de contrôler les appareils cardiographiques. — Désaccord avec les expériences de Fick. — Contrôle du cardiographe. — Nécessité d'expériences nouvelles pour éclairer l'interprétation des tracés du cœur. — Plan de ces expériences.

Pour recueillir avec facilité la pulsation du cœur, il faut se rapprocher des conditions de l'expérience faite sur les animaux et, au moyen d'un tube à air, transmettre à distance le mouvement du cœur à l'appareil écrivant. Déjà Buisson avait recueilli de bons tracés avec un entonnoir de verre dont le bec se continuait, par un tube de caoutchouc, avec un tambour à levier. La peau des parois thoraciques ferme exactement le pavillon de cet entonnoir, et les déplacements qu'elle subit à chaque pulsation du cœur compriment et raréfient

tour à tour l'air contenu dans cet espace clos mis en communication avec l'appareil inscripteur.

Mais les courbes obtenues dans ces conditions variaient considérablement, suivant la position de l'entonnoir. J'ai montré que deux de ces tracés pouvaient même être tout à fait inverses l'un de l'autre, si l'on comparait celui qu'on obtient en explorant la pulsation au point précis où le cœur touche les parois thoraciques à celui que donne l'entonnoir placé tout à fait en dehors du cœur. Dans ces conditions, le tracé est *négatif*; il donne les *minima* de la courbe au moment de la systole et les *maxima* pendant le relâchement ventriculaire. Cela tient à ce que l'entonnoir, ne reposant plus sur la région du thorax qui touche les ventricules, ne peut signaler les changements de consistance de ces organes, mais seulement leurs changements de volume dont l'effet se propage à une assez grande distance du cœur. Tout autour des ventricules, les parties molles sont attirées par le vide que chaque systole produit; les espaces intercostaux se creusent, et l'air, raréfié da: s l'entonnoir, produit un abaissement du tracé.

Enfin, si l'instrument est appliqué dans une position intermédiaire, en partie sur le ventricule et en partie en dehors, les tracés prennent une complication extrême qui les rend tout à fait indéchiffrables.

J'ai fait différents essais pour obtenir, à coup sûr, la pulsation positive des ventricules. Les conditions sont à peu près les mêmes que pour obtenir le tracé du pouls. Il faut que l'appareil explorateur déprime et déforme, à travers les parois thoraciques, le ventricule dont il doit ressentir les changements de consistance et de volume. Je recourus d'abord au stéthoscope de Kœnig, espèce d'entonnoir fermé par une double membrane, entre les feuillets de laquelle on injecte de l'eau, ce qui forme une sorte de lentille bi-convexe de liquide. L'instrument s'applique exactement aux parois thoraciques, exerçant contre elles une pression qui se localise assez exactement sur le point où la pulsation est positive. Mais cet appareil a peu de durée et n'est pas encore d'une sensibilité assez grande.

Plus récemment j'ai employé d'autres *explorateurs de la pulsation cardiaque* dont les indications sont meilleures.

La figure 14 représente une coupe d'un de ces appareils dans ses dimensions réelles. Une sorte de coquille de bois, légèrement excavée, présente des bords arrondis qui s'appliquent exactement sur les parois de la poitrine, de façon que la peau de la région précordiale enferme l'air dans cette capsule qui communique, par un tube et un tuyau de caoutchouc, avec le

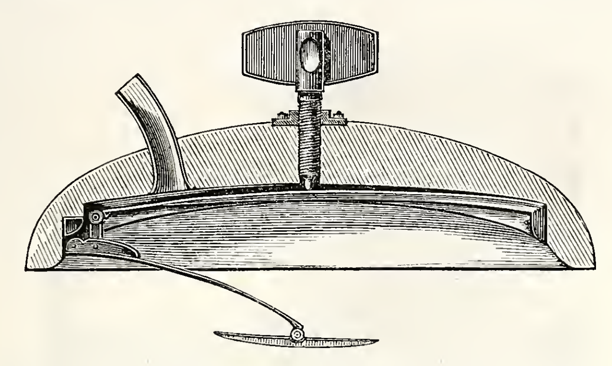


Fig. 14. — Explorateur à coquille pour les pulsations du cœur

tambour d'un cardiographe. Au fond de la capsule se trouve un ressort que l'on peut armer plus ou moins, en tournant une vis de réglage qui fait saillie sur la surface convexe. Suivant la tension de ce ressort, on fait saillir plus ou moins une petite plaque d'ivoire destinée à exercer sur la région précordiale une pression élastique. Cette plaque déprime la peau pendant la diastole ventriculaire, mais elle est repoussée pendant la systole. De là résulte un mouvement de soufflet sous l'influence duquel le levier du cardiographe entre en mouvement.

Les tracés obtenus avec cet appareil sont identiques à ceux que fournissait le stéthoscope de Kœnig ; mais comme on peut, en tournant la vis extérieure, régler la sensibilité de l'instrument, le nouvel appareil est préférable, car il trouve moins d'individus réfractaires à l'étude graphique de la pulsation cardiaque. Enfin, cet appareil est d'une solidité parfaite, ce qui est très-important.

Comme la coquille ne fonctionne qu'à la condition que ses bords soient exactement adaptés contre la peau, afin de produire une clôture hermétique, cet explorateur est difficile-

ment applicable sur les animaux, à cause des poils qui empêchent l'adaptation parfaite. Il faut alors mouiller la région explorée avec de l'eau de savon ou avec un corps gras qui empêche le passage de l'air sur les bords de l'appareil. Mieux vaut encore employer un explorateur dont la cavité soit naturellement close. La figure 15 représente la disposition qui m'a le mieux réussi.

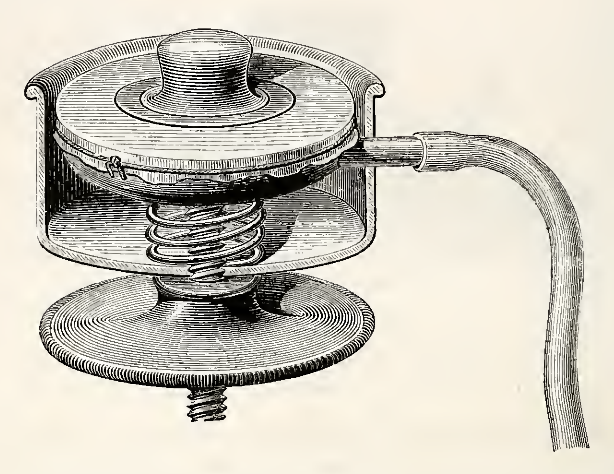


Fig. 15. — Explorateur à tambour applicable sur l'homme et sur les animaux. — En tournant la vis de réglage, on fait saillir plus ou moins le bouton de l'explorateur ce qui augmente ou diminue la sensibilité de l'instrument. (La cloche de bois a été coupée par sa moitié, pour laisser voir les pièces intérieures.)

A l'intérieur d'une cloche de bois dont le fond est perforé, se trouve une capsule de métal qui s'ouvre par un tube traversant le fond de la cloche. La capsule, fermée en bas par une membrane de caoutchouc, renferme un ressort-boudin assez faible qui fait légèrement saillir la membrane en dehors. Un disque d'aluminium et un bouton de liége reposent sur cette membrane. Toute pression exercée sur le bouton chasse l'air de la capsule, à travers le tube qui la termine, jusque dans les appareils inscripteurs.

Quand on applique par ses bords la cloche de bois contre les parois de la poitrine, de façon que le bouton saillant repose sur le point que l'on veut explorer, il faut pouvoir exercer avec ce bouton une pression plus ou moins forte sur la région cardiaque. Cela s'obtient en tournant une vis de réglage placée sur fond de la cloche de bois. Cet appareil peut s'ap-

pliquer indifféremment sur l'homme et sur les animaux ; il est donc, à ce point de vue, préférable à l'explorateur à coquille. Au reste, tous deux fournissent des tracés identiques.

Les appareils inscripteurs ont subi également des modifications importantes depuis l'époque où ils ont été employés aux expériences physiologiques sur les grands mammifères.

Le mouvement d'horlogerie qui entraîne le papier a été rendu léger et portatif. C'est parfois un petit cylindre couvert de papier enfumé, contenu dans une boîte avec les tambours à levier qui inscriront un ou plusieurs tracés à la fois (1). D'autres fois on emploie une bande de papier sans fin, comme dans l'appareil représenté fig. 16, quand on veut obtenir des tracés de grande longueur.

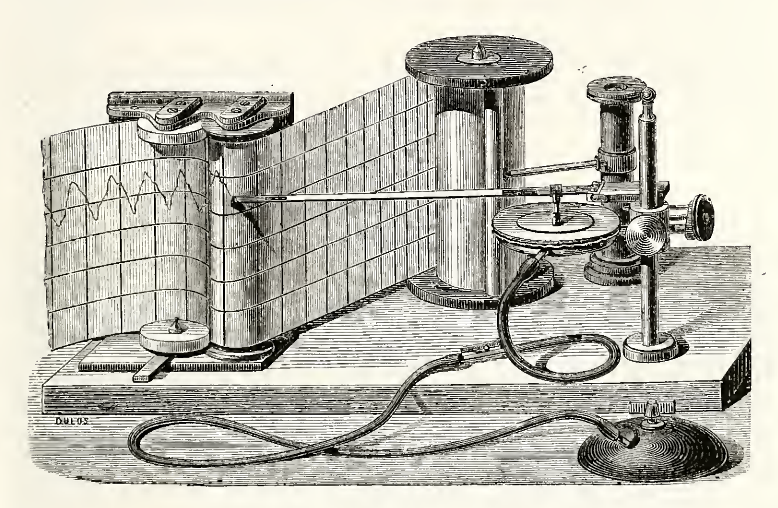


Fig. 16. — Polygraphe sorti de sa boîte et muni de l'explorateur à coquille pour la pulsation du cœur.

Le papier, enroulé sur une bobine, y est tenu légèrement pressé par une baguette d'ivoire qu'un ressort appuie avec une force constante. Un mouvement d'horlogerie, invisible dans la figure, conduit uniformément la bande de papier devant la plume qui termine le levier, et qu'on charge d'encre ordinaire.

L'appareil est monté sur une planchette rectangulaire qui

(1) On inscrit alors avec une pointe sèche, sur le noir de fumée, puis on fixe le tracé au vernis photographique.

entre exactement dans une boîte où l'on peut enfermer l'instrument avec les différents accessoires qui servent à son usage.

Je nomme ces instruments *polygraphes*, à cause de la diversité des tracés qu'ils peuvent fournir. On peut en effet, sur le même support, placer deux ou plusieurs *tambours à leviers* et inscrire ainsi, d'une manière simultanée, deux ou plusieurs phénomènes distincts, tels que la pulsation du cœur, celle des carotides ou de la radiale, les mouvements d'expansion des tumeurs pulsatiles, la respiration, l'action musculaire, etc. Mais il faut alors employer des explorateurs particuliers à la place de celui que la figure 16 représente en dimensions réduites, et qu'on reconnaîtra facilement pour celui qui est déjà décrit dans la figure 14 comme destiné à explorer la pulsation cardiaque.

Le tambour à levier a subi lui-même d'utiles modifications; sa disposition nouvelle est représentée, figure 17.

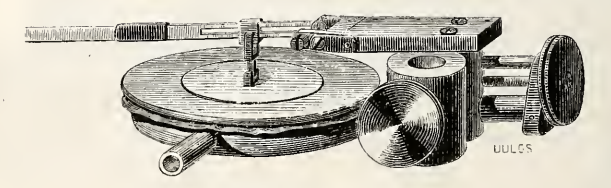


Fig. 17. Tambour à levier perfectionné

Une pièce doublement articulée au levier et à la membrane du tambour assure la solidarité parfaite de ces deux parties de l'appareil et empêche que dans les mouvements brusques le levier soit projeté au loin, ce qui compromettrait la fidélité des tracés.

Mais le peint le plus important, dans la cardiographie humaine, est d'empêcher, autant que possible, les pertes de mouvement dans la transmission de la pulsation du cœur jusqu'au style qui doit l'inscrire. En général le déplacement qu'éprouve la paroi thoracique au devant des ventricules est peu étendu, de sorte que, malgré sa force considérable, ce mouvement communiqué à une colonne d'air, intermédiaire éminemment compressible, n'arrive au style inscripteur que très-affaibli. Aussi, est-il indispensable de ne créer au déplace-

ment de l'air que très-peu de résistance, en supprimant tout passage étroit sur le trajet des tubes. Il faut en outre que la membrane du tambour à levier inscripteur soit très-souple et non tendue. Enfin on doit atténuer, autant que possible, les résistances de frottement que la pointe traçante éprouve sur le papier. Toutes les fois qu'on doit inscrire une pulsation très-faible, le mieux est de se servir du papier noirci à la fumée et d'employer un style traceur d'une flexibilité extrême, tel que ceux qu'on obtient avec de la baleine ou de la plume amincies à la lime.

Ces détails techniques étaient nécessaires pour mettre les expérimentateurs qui voudront étudier la pulsation du cœur à l'abri des échecs que leur causerait l'emploi d'appareils insuffisamment sensibles. Dans les conditions qui viennent d'être décrites, on a, presque toujours, un tracé très-net. Si, parfois, il a peu d'amplitude, il faudra l'inscrire sur un cylindre qui tourne avec lenteur. Ces tracés microscopiques, examinés au besoin à la loupe, montrent nettement tous les détails de la pulsation du cœur.

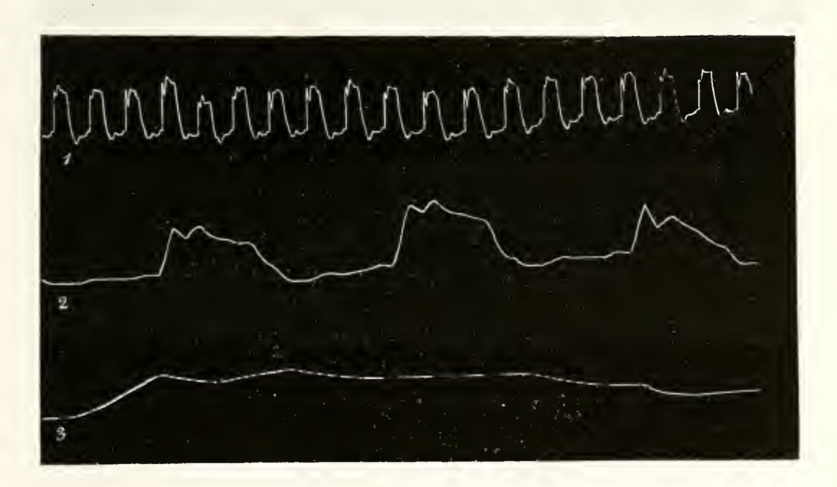


Fig. 18.— Pulsation du cœur de l'homme recueillie successivement avec 3 vitesses croissantes de rotation du cylindre. — Ligne 1, petite vitesse. — Ligne 2, vitesse modérée. — Ligne 3, grande vitesse ; déploiement exagéré du tracé d'une pulsation. (*Héliogravure.*)

Il est fort utile, en général, de proportionner la vitesse de rotation du cylindre à l'amplitude des mouvements du levier,

afin que, par une vitesse trop grande ou trop faible, le tracé ne subisse pas une déformation qui le rende méconnaissable. La pulsation du cœur prise sur un même sujet, au même instant de la journée, a fourni les trois tracés figure 18. Le meilleur choix que l'on puisse faire, dans chaque cas, pour la vitesse à donner au cylindre, serait celui qui donnerait un tracé où la phase systolique de la pulsation serait sensiblement inscrite dans un carré, comme dans la ligne 2, figure 18.

J'ai donné au cylindre ou au papier de mes polygraphes des vitesses qui sont convenables pour inscrire la pulsation du cœur avec l'amplitude qu'elle présente dans la plupart des cas, et qui est d'un centimètre environ. La vitesse correspondante à cette amplitude serait à peu près de 2 centimètres par seconde.

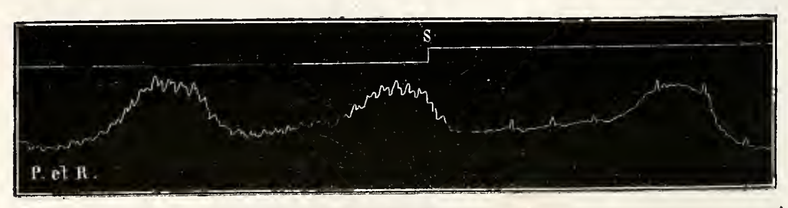


Fig. 19. — Tracé du cœur d'un lapin. — Les deux pneumogastriques ont été coupés, ce qui modifie les influences respiratoires. — Au point S, marqué par l'inflexion d'une ligne qui donne le signal de l'excitation électrique, on galvanise le bout périphérique d'un des nerfs vagues ; arrêt presque complet des mouvements du cœur.

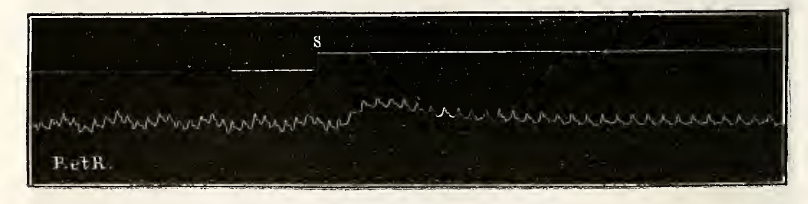


Fig. 20. — Cœur du lapin ; un seul pneumogastrique a été coupé ; au moment du signal S on galvanise le bout central du nerf vague. — Arrêt de la respiration ; conservation des mouvements du cœur.

Mais, dans les expériences physiologiques, lorsqu'on opère sur de petits animaux, on n'a que des tracés de très-petite amplitude ; il faut, en conséquence, diminuer beaucoup la vitesse du cylindre. La figure 19 représente, inscrites sur un mouvement lent les pulsations du cœur d'un lapin auquel, en S, on galvanise le bout périphérique d'un nerf vague.

La figure 20 montre, sur un autre lapin, les effets de la galvanisation du bout central du même nerf.

Cependant, s'il s'agissait d'estimer la fréquence des pulsations du cœur ou de mesurer la durée de leurs différentes phases, il serait utile de choisir une vitesse plus grande, sauf à obtenir des pulsations trop peu hautes par rapport à leur longueur. La figure 21 est la pulsation du cœur d'un lapin



Fig. 21. — Pulsation du cœur du lapin. — Ce tracé serait identique à celui de la fig. 20, s'il n'était recueilli sur un axe plus rapide.

inscrite avec une vitesse de 5 centimètres par seconde (sur le deuxième axe de l'enregistreur muni d'un régulateur Foucault).

Il ne serait pas possible d'analyser les formes très-variées de la pulsation du cœur que traduit le cardiographe, soit à l'état physiologique, soit dans les maladies, s'il restait quelque doute dans l'esprit du lecteur sur la fidélité des indications fournies par l'instrument, ou si la réalité des théories ci-dessus exposées, relativement à la signification des tracés, pouvait être mise en doute.

Au point de vue de la fidélité des tracés du cardiographe, il vient récemment de se produire des objections qui peuvent trouver crédit auprès des physiologistes, en raison de l'autorité de leur auteur, le professeur A. Fick (1).

(1) Ce savant, répétant les expériences dè cardiographie physiologiques, ne s'est pas servi des appareils que j'avais employés avec le professeur Chauveau. Il leur a substitué un manomètre à ressort (*Federkymographion*) sur le modèle de celui de Bourdon ; appareil excellent pour les mesures de la pression d'un liquide, lorsque cette pression ne varie pas d'une manière très-rapide, mais incapable, ainsi qu'on va le voir, de signaler fidèlement des variations de pression très-brusques et très-considérables, telles qu'il s'en produit dans les cavités du cœur.

Voici le fait : Chauveau et moi, nous avons signalé, dans le ventricule gauche et dans l'aorte du cheval, des valeurs très-voisines pour les maxima de pression. Fick trouve au contraire, avec son instrument, que : *si les battements du cœur sont rapides*, les maxima de pression ne sont pas égaux dans le

La différence que ce physiologiste a trouvée entre ses courbes et celles du cardiographe s'accuse surtout quand les mouvements du cœur ont une grande rapidité et doit s'expliquer par une sorte de paresse de son instrument, dans lequel le sang pénètre. Le cardiographe, au contraire, comme tous les appareils qui transmettent, au moyen de l'air, les mouvements qui doivent être inscrits, possède une rapidité de transmission extrême (1) et une fidélité dont je ne veux d'autre preuve que l'expérience suivante.

Si l'on prend, comme appareil explorateur, un tambour fermé par une membrane élastique et mis en rapport, au moyen

ventricule gauche et dans l'aorte (a). Et, chose plus singulière, c'est dans l'aorte que s'observent les maxima de pression. Avec 144 battements à la minute, la pression du sang dans l'aorte oscillait de 104 à 128mm de mercure ; la pression ventriculaire ne s'élevant pas au-dessus de 80mm. Pour le physiologiste allemand, ce résultat semble surprenant, et même paradoxal. Je n'hésite pas à y voir l'effet naturel d'une mobilité insuffisante de l'instrument.

Toutes les fois qu'un manomètre quelconque reçoit la pression qu'il signale, par l'intermédiaire d'un tube plein de liquide, cette pression exige un certain temps pour se transmettre, et si la variation en est très-rapide, l'appareil donne des oscillations de plus en plus bornées dans leur étendue. Que cette rapidité devienne plus grande encore, ou bien que le tube par lequel se transmet la pression du liquide devienne plus résistant, le manomètre n'oscillera presque plus, et signalera une moyenne entre les maxima et les minima (b) de la pression véritable.

Dans l'expérience de Fick, l'appareil doit traduire une pression qui tombe au-dessous de zéro quand le ventricule est relâché et qui, pendant la systole, s'élève à 128mm ou même plus. De telles variations ne peuvent se transmettre au manomètre, c'est pourquoi sa colonne n'exécute que des oscillations incomplètes et ne s'élève qu'à 80mm de mercure.

Par une conséquence nécessaire, le minimum de l'oscillation ne devait pas tomber au-dessous de zéro, c'est-à-dire à sa valeur réelle, quand les mouvements du cœur étaient très-rapides.

Quant à l'élévation plus grande des maxima de la pression aortique, ce fait résulte naturellement du moindre abaissement des minima de cette pression. Celle-ci, en effet, grâce aux valvules sigmoïdes, ne tombait jamais au-dessous de 104mm de mercure environ ; la pression moyenne dans ce vaisseau se trouvait, par cela même, très-relevée, et les maxima des courbes obtenues, s'ils n'atteignaient pas tout à fait la valeur réelle de la pression aortique, donnaient nécessairement des indications bien plus rapprochées de la vérité que pour la pression ventriculaire.

(a) Uber die Schwankungen des Blutdruckes in verschiedenen Abschnitten des Gefassystem (*Verhandlungen der phys. med. Gessellschaft in Würtzburg*, vol. IV, p. 223).

(b) C'est sur ce principe que j'ai construit un manomètre à moyennes (manomètre compensateur). — (*Physiol. méd. de la circul.*, p. 141.)

(1) Cette vitesse est voisine de celle du son dans l'air.

d'un tube à air, avec le tambour à levier inscripteur, on peut obtenir le tracé de mouvements extrêmement rapides.

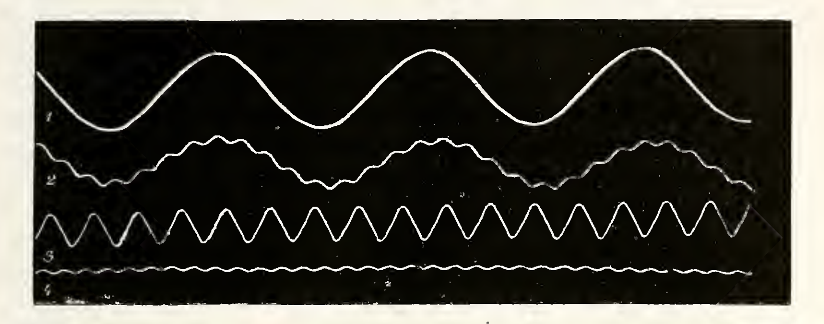


Fig. 22. — Tracés des vibrations de divers diapasons transmises par l'air. — Ligne 1, dix vibrations par seconde. — Ligne 2, 10 vibrations combinées à 80 par seconde. — Ligne 3, 50 vibrations par seconde. — Ligne 4, 100 vibrations par seconde. (*Héliogravure.*)

Après avoir fait vibrer des diapasons de 10, de 50, de 100 vibrations doubles par secondes, on met l'une des branches de ces instruments en rapport avec la membrane du tambour explorateur. Aussitôt, le tambour inscripteur fournit le tracé des vibrations du diapason employé, quelle que soit la fréquence ou l'amptitude de ses mouvements.

Dans la figure 22, on voit un tracé de 10 vibrations par seconde, un autre de 50 ; un autre de 100 ; un autre enfin, dans lequel se trouvaient combinées des vibrations de 10 et de 80 par seconde. Il est clair que cette rapidité de mouvement ne peut être acquise qu'à la condition d'employer un levier très-léger comme inscripteur. En diminuant indéfiniment la masse du levier et les frottements du style sur le papier, on accroît indéfiniment aussi le nombre des vibrations qui peuvent être inscrites. Avec un levier très-léger et en écrivant sur une glace enfumée, j'ai inscrit 250 vibrations doubles par seconde.

Quel est le manomètre qui obéirait à des mouvements aussi rapides ?

Les détails que renferme la pulsation cardiaque ne correspondent pas à des rapidités aussi grandes. Aucune des ondulations qui se trouvent dans un tracé de cœur ne correspond à un mouvement dont la durée soit moindre de 1/20 de seconde ; on peut donc avoir une parfaite confiance dans la fidélité des instruments que nous avons employés.

La théorie de la pulsation du cœur, telle qu'elle vient

d'être exposée dans les pages qui précèdent, a-t-elle été suffisamment probante; le public médical et l'opinion scientifique l'ont-ils acceptée comme entièrement démontrée? Sur cette question il semble qu'on doive répondre par la négative.

Si l'on se reporte aux conclusions des différents rapports faits sur les expériences cardiographiques et particulièrement à ceux de l'Académie de médecine et de l'Académie des sciences, on voit que le point qui semble le mieux établi, c'est la détermination de la succession véritable des différents mouvements du cœur. Mais pour ce qui touche à la théorie de la pulsation cardiaque déduite de l'étude des tracés, on constate que ce point n'est pas admis sans conteste. Le rapport d'une commission nommée par l'Académie des sciences renferme même des réserves qui montrent que de nouvelles expériences doivent être faites pour mieux éclaircir cette question (1). C'est qu'en effet il y a bien loin de la forme fort simple de l'effort systolique du ventricule à la forme très-compliquée des changements de pression qui traduisent au dehors la pulsation du cœur. Pour faire voir comment et sous quelles influences ce mouvement se transforme, il faut reprendre la question dès son origine. Il faut montrer d'abord en quoi consistent les actes musculaires qu'on appelle systole et diastole des cavités du cœur; on devra ensuite étudier ce qui arrive quand cet acte musculaire s'exerce sur le liquide sanguin contenu dans ces cavités. Dans cette étude, passant des cas les plus simples aux cas les plus compliqués, il faudra suivre la pulsation cardiaque chez les différents animaux, depuis ceux dont le cœur offre des mouvements lents et faciles à saisir, jusqu'à ceux dont les pulsations présentent une rapidité et une complication très-grandes.

(1). Après avoir parlé de la succession des différents actes que signale la cardiographie, le rapporteur s'exprime ainsi: « Les auteurs du Mémoire ont rendu visibles et faciles à constater des phénomènes dont l'observation était très-difficile, et leurs expériences nous semblent devoir faire cesser toute discussion sur ce point de l'histoire de la circulation du sang de l'homme et des animaux qui se rapprochent le plus de lui par leur organisation. Il peut rester encore diverses questions à résoudre relativement à la manière dont la systole ventriculaire détermine la pulsation cardiaque; mais, dans notre opinion, il est aujourd'hui bien démontré qu'elle est la cause de ce phénomène. »

Enfin, pour justifier les théories qu'il y aura lieu d'émettre relativement à tous ces actes et aux inflexions de la courbe qui les traduisent dans les tracés, je recourrai à cet ordre de preuves que je considère comme la démonstration absolue. Je veux parler de la *synthèse* de ces phénomènes; de la reproduction, par des appareils artificiels, de tous les détails de la circulation cardiaque, y compris la pulsation elle-même.

Ainsi, après avoir assigné à telle forme normale ou pathologique de la pulsation une cause déterminée, je devrai, en introduisant cette cause dans la circulation de l'appareil factice, obtenir une pulsation dont le tracé soit identique à celui de la pulsation véritable. Tel est le plan qui sera suivi dans ce travail.

III. — Du cœur considéré comme muscle.

Dissemblances apparentes entre le cœur et les autres muscles. — Apparente spontanéité des systoles. — La discontinuité d'action n'est pas un caractère spécial au cœur. — Tous les muscles procèdent par actes discontinus. — Théorie générale de l'action des muscles; secousses et contraction. — La systole du cœur n'est qu'une secousse; preuves tirées de la myographie; preuves empruntées aux phénomènes électriques qui accompagnent les mouvements du cœur. — Temps perdu du muscle cardiaque.

Au commencement de ce siècle, l'anatomie et la physiologie, s'inspirant des idées de Bichat, distinguaient deux sortes de muscles, d'après leurs structures et leurs fonctions : les muscles de la vie organique et ceux de la vie animale. A cette époque, le cœur avait peine à trouver sa place dans l'un ou l'autre de ces groupes. Ces divisions factices se sont effacées peu à peu, de sorte que le système musculaire se présente aujourd'hui sous un aspect nouveau. Il faut maintenant admettre une série de variétés de muscles où s'observent, au point de vue de la structure, tous les degrés de la striation de la fibre ; au point de vue de la fonction, tous les degrés de vitesse et de lenteur du mouvement produit. Dans cette

série, où les nuances s'échelonnent sans transition, le cœur trouve aisément sa place.

Toutefois, dans la fonction musculaire du cœur, certaines particularités restaient encore. La spontanéité apparente des mouvements de cet organe, l'intermittence qui paraît être l'essence de son action, semblaient constituer des caractères particuliers au muscle cardiaque. La découverte de ganglions nerveux à l'intérieur du cœur montre que cet organe ne se comporte pas différemment des autres, et que, renfermant en lui-même les centres principaux de son innervation, il se rapproche en cela de certains autres muscles de l'économie. Quant à la discontinuité de son action, elle ne saurait, non plus, constituer un caractère spécial.

Il semble aujourd'hui démontré que tout muscle n'agit que par une série de secousses qui peuvent se fusionner entre elles et disparaître à nos yeux, dans la contraction volontaire comme dans le tétanos artificiel. Ces secousses se traduisent, soit à l'auscultation, par un son qui les révèle, soit à la méthode graphique qui les inscrit d'une façon évidente.

Cette théorie qui s'est dégagée peu à peu des expériences physiologiques, trouve son germe dans les observations de Volta ; elle s'est développée entre les mains de Weber qui définit la nature du tétanos électrique ; Du Bois-Reymond la confirma par ses découvertes sur la variation négative des courants nerveux et musculaires, tandis que Wollaston, Haughton, Helmholtz, apportaient en sa faveur des preuves nouvelles tirées des sons que rend le muscle contracté. La myographie enfin, fit voir à Aeby la formation et le transport de l'onde musculaire, tandis que je signalais, dans les différents cas de tétanos des muscles, l'existence de vibrations plus ou moins rapides que l'œil ne pouvait saisir (1).

Réduite à sa formule la plus simple, la théorie de l'action musculaire peut s'exposer ainsi : Tout muscle, lorsqu'il reçoit directement ou par l'intermédiaire de son nerf, une excitation unique, donne naissance à un mouvement brusque : *la secousse* (*zuckung* des auteurs allemands). Cette secousse

(1) Pour la théorie de la contraction musculaire, voir : *Du mouvement dans les fonctions de la vie*, p. 444.

augmente ou diminue de durée sous certaines influences, telles que la fatigue ou le repos, le froid ou la chaleur. — Quand le muscle reçoit, directement ou par l'intermédiaire de son nerf, des excitations successives assez rapprochées pour que chacune des secousses n'ait pas le temps de s'accomplir avant l'arrivée de la suivante, les secousses se fusionnent et donnent naissance à un état de raccourcissement constant du muscle. Si la fusion est imparfaite, le raccourcissement du muscle est accompagné de vibrations ; si la fusion est parfaite les vibrations disparaissent comme dans la contraction volontaire, où la discontinuité ne se traduit plus que par le son que rend le muscle contracté.

La fusion se produit d'autant plus facilement que les secousses sont de plus longue durée ou qu'elles se suivent à plus courts intervalles.

Si, maintenant, nous abordons l'étude de la systole du cœur avec ces notions sur la fonction musculaire, la première question qui se pose est celle-ci : Quelle est la nature de la systole du cœur ? Est-ce une secousse ou une contraction ?

Tous les auteurs emploient le mot de *contraction* pour l'appliquer au mouvement de resserrement des oreillettes et des ventricules. On a pu voir que je désignais ces actes par le vieux mot de *systole,* qui ne préjuge rien. Ce choix tient à ce que la systole du cœur ne me semble pas correspondre à la contraction des autres muscles, mais à leur secousse : à cet acte élémentaire qui se produit par une excitation simple.

Ainsi, le cœur donnerait une série de secousses successives, se rapprochant plus ou moins de la fusion ou contraction, sans pouvoir l'atteindre. (Du reste, cette fusion parfaite serait mortelle, elle supprimerait tout mouvement du sang dans le cœur.) Les systoles plus ou moins énergiques correspondraient aux vibrations plus ou moins intenses que présentent les muscles incomplètement contractés. Cette énergie serait à son maximum quand les secousses systoliques seraient le plus éloignées les unes des autres, ou quand chacune se ferait avec plus de brusquerie.

Les expériences suivantes ont pour but de vérifier cette théorie. Elles consisteront à explorer avec le *myographe* les

caractères des mouvements systoliques du cœur, et à les comparer à ceux des autres muscles.

Chez les animaux à sang froid, chez les mammifères hibernants, ou chez ceux qu'on a profondément refroidis, le cœur, détaché du corps, continue à battre pendant longtemps. Chez les animaux à sang chaud qu'on vient de tuer, les systoles s'éteignent très-vite, en général, mais pas assez pour qu'on ne puisse inscrire quelques-uns de ces mouvements. On se sert, à cet effet, du myographe représenté figure 23, appareil qui donne la forme de l'acte systolique d'après le gonflement du muscle (1).

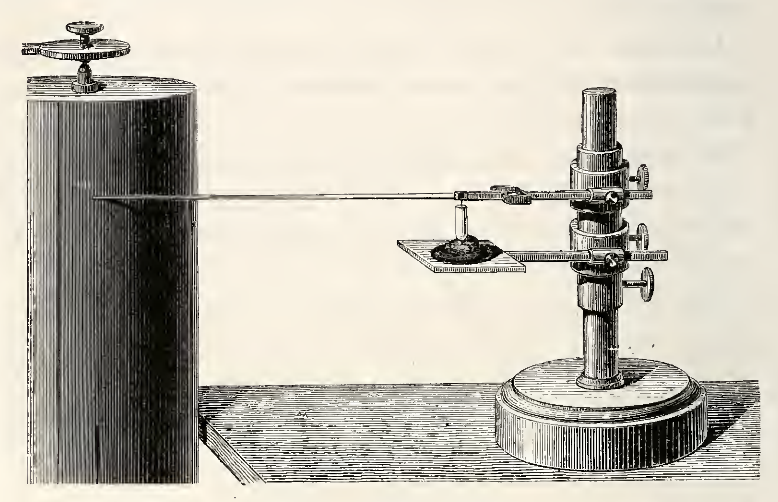


Fig. 23. — Myographe du cœur.

Le cœur de l'animal est placé dans un petit godet de cire, modelé pour le contenir exactement, et disposé sur une tablette de métal établie sur un support. Au-dessus du cœur, est placé un levier horizontal de bois mince et léger ; ce levier, dont la base est métallique, porte un curseur auquel est appendu et articulé un petit bâtonnet de moelle de sureau ; on place ce bâtonnet sur la partie du cœur dont on veut explorer le mouvement (2).

(1) Voir pour les différentes méthodes de myographie : *Du mouvement dans les fonctions de la vie*, p. 222.

(2) Il est bon qu'une petite pointe soit appliquée à l'extrémité du bâtonnet de sureau qu'elle dépasse légèrement. Cette pointe s'implante dans la substance du cœur et prévient tout déplacement latéral.

La plume qui termine le levier de ce myographe trace sur un cylindre tournant des courbes, dont l'ascension correspond à la systole et la descente à la diastole du cœur. Sur toutes les espèces animales, le cœur, vide de sang et soumis à l'étude myographique, donne des courbes semblables, dont la figure 24 montre un spécimen obtenu sur la grenouille. De bas en

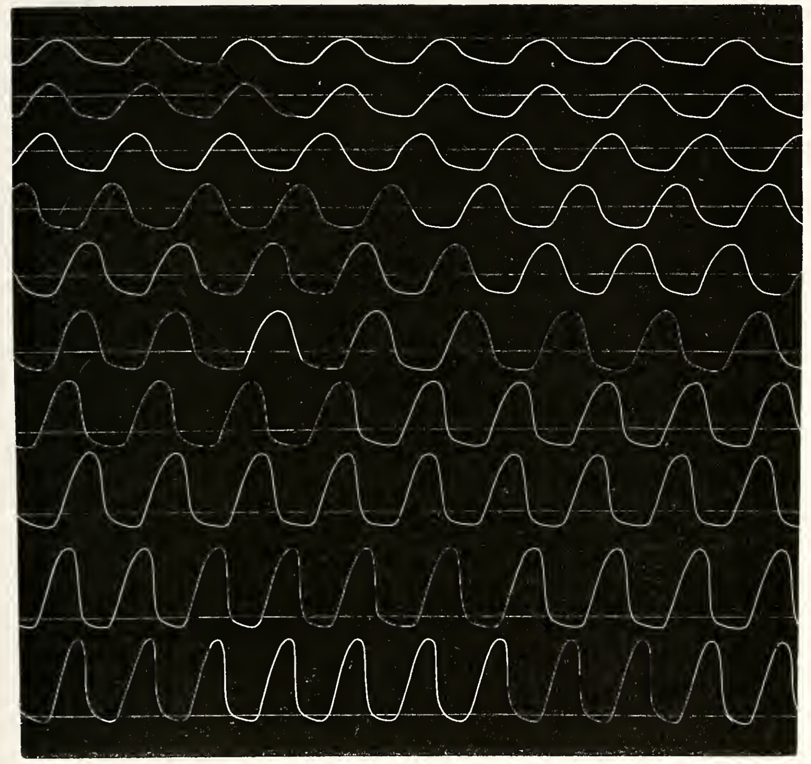


Fig. 24. — Systoles du cœur détaché d'une grenouille, inscrites au myographe. — Le tracé se lit de bas en haut; on y voit les effets graduels de la fatigue. — Une ligne horizontale sert de repère dans chaque tracé et montre que les maxima et les minima des courbes s'abaissent graduellement sous l'influence de la fatigue, ce qui tient à ce que les systoles sont moins fortes et les diastoles plus complètes.

haut se lit une série de courbes correspondant à des degrés croissants de fatigue du muscle. Chez toutes les espèces animales, l'épuisement du cœur, bien qu'il varie sous le rapport de la rapidité avec laquelle il se produit, s'accompagne des mêmes transformations du mouvement ; les systoles perdent à la fois leur amplitude et leur fréquence.

Or, si nous laissons de côté ce qui a rapport au rhythme du cœur et dépend de l'innervation de cet organe, pour ne considérer que la forme du mouvement cardiaque, nous trouvons une ressemblance parfaite avec la *secousse* des autres muscles.

La *forme* de la systole est celle d'une secousse musculaire : la période ascendante (qui correspond au raccourcissement du muscle) est plus brève que la période descendante (retour du muscle à sa longueur maximum).

La *fatigue* modifie dans le même sens la systole du cœur et la secousse d'un muscle : de part et d'autre, il y a diminution de l'amplitude et augmentation de la durée du mouvement.

La *chaleur* et le *froid* impriment les mêmes caractères à la systole du cœur et à la secousse d'un muscle. La chaleur donne à ces mouvements de la brièveté et de l'énergie.

Cette analogie entre la systole et une secousse musculaire ne saurait être infirmée par la différence de durée que présentent ces deux actes. Sur la grenouille, la systole du cœur est beaucoup plus longue que la secousse d'un muscle volontaire ; mais on sait que la durée d'une secousse varie sous l'influence d'un grand nombre de conditions. En refroidissant les muscles d'une patte de grenouille, on rend leur secousse aussi longue et même plus longue que la systole du cœur. D'autre part, chez les différentes espèces animales, on observe des différences énormes dans la durée de la secousse musculaire. J'ai trouvé que les muscles pectoraux d'un oiseau agissent à peu près 75 fois plus vite que ceux de la tortue.

La systole n'a pas la même durée dans les différentes parties du cœur : l'oreillette accomplit la sienne beaucoup plus



Fig. 25. — Durées relatives de la systole de l'oreillette O et de celles du ventricule V sur un cœur de lapin refroidi.

vite que le ventricule, ainsi qu'on le voit par la figure 25 recueillie sur un lapin.

Ainsi, d'après la forme du mouvement qui la caractérise, d'après les effets que produisent sur elle la chaleur, le froid et la fatigue, la systole du cœur ressemble à une secousse musculaire.

Toutefois, comme dans certains cas, une série de secousses fusionnées peut donner naissance à un mouvement simple en apparence, mais complexe en réalité, il ne faut pas se contenter de la forme d'une systole cardiaque, pour conclure absolument que ce mouvement n'est qu'une secousse.

Une autre démonstration nous sera fournie par les phénomènes électriques qui accompagnent la systole du cœur et qui, identiques à ceux qui se produisent pendant la secousse d'un muscle, diffèrent de ceux qui accompagnent le tétanos.

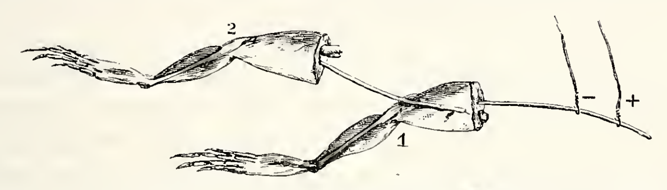


Fig. 26. — Pattes de grenouilles disposées à la manière de Matteucci, pour obtenir les mouvements induits. 1. Patte inductrice. 2. Patte induite.

Matteucci a découvert un phénomène très-remarquable auquel il a donné le nom de *contraction induite* (1). Si l'on prend (figure 26) une patte de grenouille préparée à la manière de Galvani et qu'on applique, sur le muscle de celle-ci, le nerf d'une seconde patte préparée de la même manière, on voit qu'en excitant le nerf de la première patte, on provoque des mouvements dans les deux à la fois.

En inscrivant, avec le myographe, les mouvements qui se produisent dans chacune des pattes, j'ai constaté qu'ils sont toujours de même nature, c'est-à-dire que la secousse induit la secousse, tandis que le tétanos induit le tétanos.

En outre, il importe peu que la patte inductrice ait une secousse longue ou brève, modifiée ou non par la fatigue, la chaleur, le froid ou les poisons. Pourvu que la première patte donne une secousse, la seconde donnera une secousse également.

(1) Du Bois-Reymond préfère, pour désigner ce phénomène, le mot de *contraction secondaire*.

La figure 27 montre deux tracés fournis par deux pattes de grenouille, l'une inductrice, l'autre induite.

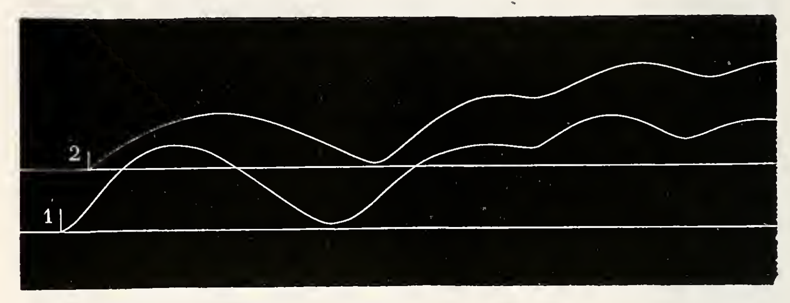


Fig. 27. — Tracés des mouvements produits par les deux pattes de grenouille disposées à la manière de Matteucci comme dans la fig. 26. Ligne 1. *patte inductrice* ; on y voit d'abord une secousse isolée, puis trois secousses presque fusionnées. — Ligne 2. *patte induite ;* mêmes mouvements que dans la ligne 1, sauf un retard dans leur production et une moindre amplitude. (Rotation rapide du cylindre.)

Si la patte inductrice est modifiée dans son action par une influence quelconque, telle que le refroidissement, l'empoisonnement par la vératrine, etc., son tracé peut être considérablement changé dans sa forme ; mais celui de la patte induite reste inaltéré.

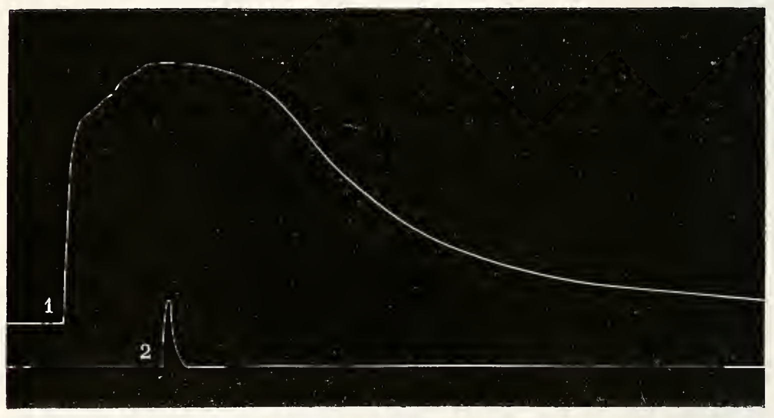


Fig. 28. — 1 secousse inductrice modifiée par l'action de la vératrine. — 2 secousse induite dans un muscle sain ; elle garde ses caractères normaux. (Rotation lente du cylindre.

De même, si l'on choisit pour inducteur un muscle dont la secousse ait une longueur extrême, un muscle de tortue, par exemple, en conservant le muscle de grenouille comme induit, on voit que, malgré sa longueur extrême, la secousse de tor-

tue n'induit que la secousse brève qui est propre au muscle de la grenouille.

Enfin, prenons un cœur de grenouille sur lequel nous plaçons le nerf d'une patte galvanoscopique et inscrivons, à la fois, le tracé de la systole et celui du muscle induit. Nous verrons que la patte de grenouille donnera une secousse à chaque systole du cœur.

Ainsi, d'après sa forme, d'après les influences qu'exercent sur elle la chaleur, le froid et la fatigue, d'après les phénomènes électriques qui l'accompagnent (1) et qui, dans une patte galvanoscopique, se traduisent par la production de secousses induites, la systole du cœur se présente comme la secousse du muscle cardiaque. Elle doit donc toujours avoir cette forme simple qui caractérise la secousse musculaire, et dans laquelle la phase de raccourcissement (systole) est plus courte que celle de retour à la longueur primitive (diastole).

Enfin, Helmholtz a signalé dans la secousse musculaire une particularité qu'on retrouve encore dans la systole du muscle cardiaque ; je veux parler du *temps perdu*. Le savant physiologiste allemand nomme ainsi le temps qui s'écoule entre le moment où un muscle a reçu une excitation électrique et celui où il réagit en donnant sa secousse.

Ce phénomène peut être observé sur le cœur dans les conditions suivantes :

Quand le cœur d'un animal est épuisé et ne donne plus que des systoles rares, si on l'excite par un courant induit, on

(1) On pourrait objecter que ces variations électriques, étudiées au moyen du galvanomètre, ne paraissent pas être semblables dans le cœur et dans les muscles. Placé sur les coussinets d'un galvanomètre, le cœur dévie l'aiguille à chacune de ses systoles, ramenant, à chaque fois l'aiguille du côté du zéro pendant sa phase systolique. Un muscle de grenouille, placé dans les mêmes conditions, ne dévie pas le galvanomètre quand on provoque en lui une secousse isolée. Cela tient à ce que la secousse musculaire d'une patte de grenouille et les variations électriques du muscle qui se produisent en même temps ont une durée trop courte pour vaincre l'inertie de l'aiguille aimantée. Mais si, en refroidissant le muscle, on accroît la durée de la secousse, on voit que l'aiguille oscille ; cette oscillation est très-prononcée quand on se sert d'un muscle de tortue dont la secousse est lente. Donders a constaté que l'état électrique du cœur passe par des phases d'intensité variées aux divers instants de la systole. En touchant le cœur à l'aide d'une patte galvanoscopique, on obtient des secousses très-fortes pendant la période diastolique, très-faibles pendant la systole.

provoque une systole qui, par son moment d'apparition, se distingue facilement de celles qui se produisent d'une manière spontanée. Or, cette systole provoquée retarde sur le moment de l'excitation ; ce retard est considérable, il atteint dans certains cas $^1/_3$ de seconde.

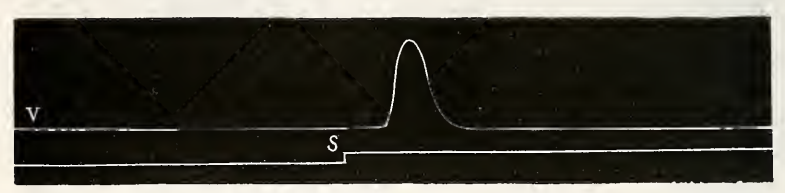


Fig. 29. — Ligne V, tracé du myographe appliqué sur le ventricule. — Ligne inférieure S moment de l'excitation électrique. — La durée du retard ou *temps perdu* est de 1/3 de seconde environ.

On serait porté à considérer, au premier abord, ce retard énorme comme une dissemblance entre la systole du cœur et la secousse d'une patte de grenouille dont le *temps perdu* n'est que de $^1/_{100}$ de seconde environ. Mais, si l'on opère sur des muscles dont la secousse est plus ou moins longue, on voit que le temps perdu croît en raison de la durée de la secousse elle-même. Ainsi, il est naturel que la systole du cœur retarde considérablement sur le moment de l'excitation, puisqu'elle représente une secousse très-longue (1).

IV. — Effets mécaniques des mouvements du cœur.

Débit du cœur à chacune de ses systoles. — Appareil pour mesurer les changements de volume du cœur pendant qu'il fonctionne. — Expériences. — Variation du volume des ondées systoliques en raison inverse de la fréquence des battements du cœur ; variation semblable de la pression artérielle. — Mesure du débit ventriculaire. — Estimation approximative du travail du cœur.

D'après ce qu'on a vu dans le précédent chapitre, le cœur est un muscle qui ne donne jamais de contraction parfaite,

(1) Si l'on doit, comme cela me semble probable, assimiler à des secousses les mouvements des muscles vasculaires et ceux de l'intestin ; ces actes sont beaucoup plus longs encore que la systole du cœur, et le *temps perdu* qui les précède peut atteindre 20 ou 30 secondes et même davantage.

mais seulement des secousses incomplétement fusionnées. La fusion peut bien tendre à se produire, ce qui diminue plus ou moins l'amplitude des systoles, mais elle ne saurait être complète. Une contraction prolongée des ventricules entraînerait la mort de l'animal, puisque le cœur ne pourrait plus se remplir et se vider tour à tour. Le volume des ondées sanguines envoyées par le ventricule, à chacune de ses systoles, se trouve sous la dépendance de la fusion plus ou moins complète de chacun de ces actes.

Des systoles rares et bien complètes enverront des ondées volumineuses ; des systoles fréquentes ne donneront que des ondées beaucoup plus petites, de sorte que le *débit du cœur* ne doit pas se mesurer au nombre des systoles qu'il exécute en un temps donné, mais a pour mesure réelle le produit du nombre des systoles par le volume de sang que chacune d'elles envoie dans les artères.

On peut démontrer ce fait au moyen de l'expérience suivante :

Prenons le cœur d'une tortue, lions tous les orifices artériels, sauf une branche de l'aorte, et tous les orifices veineux, sauf une veine cave; adaptons aux deux vaisseaux restés perméables des canules que nous mettrons en communication avec des tubes remplis de sang défibriné, nous produirons une circulation continue à travers le cœur. Ludwig, qui a introduit en physiologie cette belle méthode dans laquelle on fait fonctionner des organes détachés d'un animal, en établissant dans ceux-ci une circulation artificielle, a rendu à la science un très-grand service. Le savant physiologiste et ses élèves, Bowdicht, Cyon, etc., ont essayé, par ce moyen, de mesurer le travail d'un ventricule de grenouille qu'ils faisaient agir sur un manomètre. J'ai modifié cette méthode, de façon à obtenir plusieurs indications différentes : 1° les changements de volume du cœur à chacune de ses systoles ; 2° les changements de pression du sang dans les vaisseaux où il pénètre (ce qui mesure sensiblement l'effort du cœur) ; 3° la quantité de sang versé en un temps donné.

La figure 30 montre la disposition que j'adopte pour cette expérience. Le cœur d'une tortue, préparé comme il a été dit tout à l'heure, reçoit un tube de verre à chacun de ses orifices

artériel et veineux. Ces tubes passent à frottement par un bouchon de caoutchouc qui ferme, à sa partie supérieure, un flacon de verre dans lequel le cœur est contenu. Dans la figure 30 on voit, par transparence, le cœur de la tortue dans le flacon de verre. Par leurs extrémités qui traversent le bouchon, les deux tubes de verre se continuent avec d'autres conduits : le tube-veine, avec un tuyau de caoutchouc qui plonge dans un vase élevé rempli de sang défibriné ou de sérum ; ce tube, amorcé comme un siphon, représentera le système veineux et versera incessamment le sang par la veine-cave dans l'oreillette.

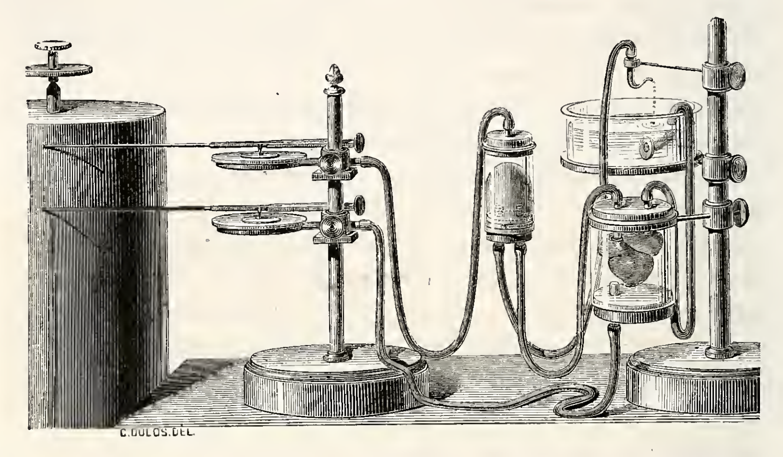


Fig. 30. — Appareil destiné à mesurer les changements de volume du cœur pendant les phases de systole et de diastole avec les changements de pression que l'effort systolique produit.

Quant au tube-artère, il est continué par un tuyau de caoutchouc qui, après avoir traversé un *sphygmoscope* dont on parlera tout à l'heure, vient, par un ajutage étroit, verser le sang que le cœur lance, dans le flacon où le tube-veine le puise continuellement. Ainsi se trouve établi un circuit fermé sur lui-même, dans lequel les principaux organes de l'appareil circulatoire sont représentés.

A) Lorsqu'on veut connaître le *volume* des différentes ondées que le cœur envoie, on obtient ce résultat en transmettant au tambour à levier inscripteur les changements de volume du cœur. (Il est clair, en effet, que le cœur perd de son vo-

lume pendant sa systole exactement celui du sang qu'il envoie dans les artères.) Pour cela, perçons un trou dans le bouchon qui ferme par en bas le flacon où est placé le cœur de tortue, et plongeons dans ce flacon un tube ouvert qui se rend par son autre extrémité à un tambour à levier (celui qui, dans la figure 30, est situé en bas). Chaque fois que le cœur, en se vidant, diminuera de volume, l'air du flacon se raréfiera, et cette raréfaction, se propageant par le tube de transmission jusque dans le tambour inscripteur, produira une descente de la courbe tracée. Inversement, quand le cœur augmentera de volume, en se remplissant pendant sa diastole, l'air sera comprimé dans le flacon et dans le tambour inscripteur, ce qui amènera une élévation de la courbe. On obtiendra ainsi des tracés dans lesquels se traduiront les durées relatives de la systole et de la diastole ventriculaire; tracés dont l'amplitude plus ou moins grande signifiera que le cœur



Fig. 31. Tracé des changements de volume d'un cœur de grenouille; variations de l'amptitude avec la fréquence. — Ligne 1. systoles rares et grandes ; S instant de leurs débuts. — Ligne 2. systoles plus fréquentes et plus petites.

expulse des ondées plus ou moins volumineuses à chacune de ses systoles. Ce volume des ondées ventriculaires sera plus ou moins grand, suivant que le relâchement du ventricule aura eu le temps de s'accomplir d'une manière plus ou moins parfaite. On comprend que, si la fréquence des systoles s'accroît considérablement, le relâchement, et par suite la réplétion des ventricules, n'ayant pas le temps de s'effectuer, le volume des ondées systoliques décroîtra beaucoup.

Ainsi se justifie ce que l'on a vu plus haut: du défaut de proportionnalité du débit du cœur au nombre des systoles.

B) Lorsqu'on veut inscrire le *changement de pression* que chaque systole produit dans le système artériel, on se sert de l'instrument nommé *sphygmoscope*, qui traverse le tube artériel, et dont nous allons décrire la fonction.

Ce sphygmoscope est formé d'une poche de caoutchouc fixée sur un bouchon percé de deux tubulures adaptées au tube artériel. Le sang traverse cette poche de caoutchouc comme il ferait d'un anévrysme. Il se produit des gonflements et des resserrements alternatifs de la poche dont les changements s'inscrivent, de la même façon que ceux du cœur lui-même, dont on vient de voir les tracés.

Le levier qui, dans la figure, est placé en haut, signale les changements de volume de l'ampoule du sphygmoscope; ce qui traduit, en définitive, les changements qu'éprouve la pression du sang dans l'intérieur de ces artères factices. Or ces changements de pression se lient d'une manière intime à la fréquence des systoles, attendu que l'écoulement du sang des artères se fait d'une manière d'autant plus complète qu'il a plus de temps pour s'effectuer, c'est-à-dire que les systoles sont plus rares. Aussi assiste-t-on à ce phénomène en apparence paradoxal, à savoir : que les pulsations artérielles sont d'autant plus énergiques que le cœur est plus épuisé et les systoles plus ralenties. Les figures 32 à 36 montrent cette transformation graduelle que subit la pulsation..



Fig. 32. — Pulsations artérielles de la tortue au début de l'expérience.



Fig. 33. — Pulsations après une heure.

C) Pour estimer le travail dépensé par le cœur en un temps donné, il faudrait avoir la double notion du volume de sang

versé par le cœur et de la résistance que cet organe a éprouvée pour pousser ce liquide.



Fig. 34. — Après trois heures.

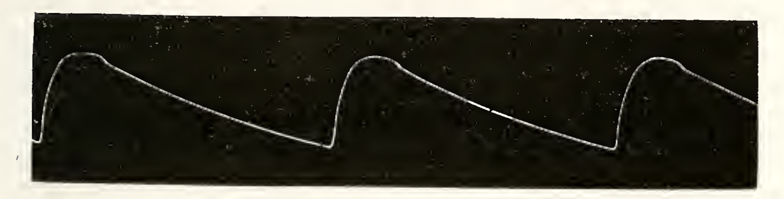


Fig. 35. — Après cinq heures.

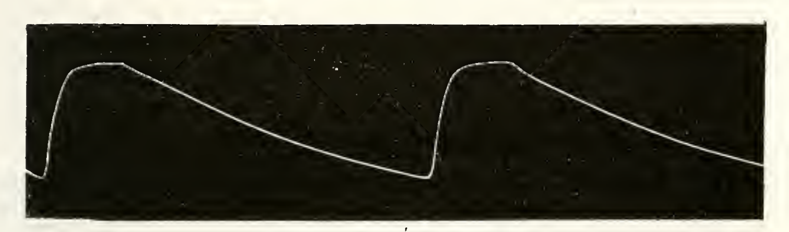


Fig. 36. — Après sept heures.

La mesure du débit ventriculaire est très-facile à obtenir. Il suffit de recevoir le sang qui s'échappe des artères, non plus dans le vase où le syphon veineux vient le reprendre, mais dans une éprouvette graduée qui s'emplirait peu à peu. En divisant le volume du liquide versé, par le nombre des systoles qui se sont inscrites pendant que l'éprouvette s'emplissait, on a le volume moyen de chaque ondée sanguine.

La résistance que le cœur éprouve à se vider est plus difficile à mesurer d'une manière absolue. Il faudrait déterminer à chaque instant la valeur manométrique de la pression du sang dans les artères, pression contre laquelle le cœur doit lutter. On conçoit toute la difficulté d'une pareille mesure, surtout chez les petits animaux. En revanche, il est très-facile

de mesurer les résistances d'une manière comparative et de les faire varier dans un sens déterminé. Ainsi, en faisant l'expérience avec l'éprouvette graduée, suivant la hauteur à laquelle on place l'éprouvette et l'ajutage d'écoulement qui s'y déverse, on fait travailler le cœur sous des charges de sang variables. On voit alors que la charge n'est pas indifférente pour le débit du cœur, et qu'il met plus de temps pour verser cent grammes de sang sous une charge d'un mètre que pour verser la même quantité sous une charge de 0^m 50.

La même expérience permet également de constater que le cœur, lorsqu'on accélère ou ralentit le nombre de ses systoles, n'effectue pas, pour cela, des quantités de travail qui varient en raison directe de la fréquence des systoles. Ainsi, par l'élévation de température, on constate que sous une charge constante, le cœur travaille d'abord avec plus d'énergie quand la température s'élève, puis, que la somme du travail effectué en un même temps diminue quand la température continue à s'élever.

Je n'entrerai pas dans plus de détails sur ces expériences relatives au travail du cœur, celles-ci devant trouver dans un autre mémoire les développements qu'elles comportent. Il me suffisait, pour le moment, de montrer que le cœur, considéré comme muscle, est soumis aux mêmes lois que les autres organes musculaires. Plus tard, il faudra faire des expériences comparées sur les conditions de travail maximum du cœur, et voir sous quelle charge, sous quelle température et avec quelle fréquence des mouvements s'obtient le maximum de travail en un temps donné.

On a vu quelle est la forme de la secousse systolique du ventricule et quels sont ses effets sur les mouvements du sang, il reste à rechercher comment ces phénomènes se traduisent au dehors par la pulsation du cœur.

V. — Pulsation du cœur décomposée en ses différents éléments.

Différences entre le tracé myographique du cœur et celui de la pulsation. — Limite à la pression maximum du ventricule. — Séparation des deux éléments de la pulsation du cœur ; tracé des changements de volume ; tracé des changements de consistance. — L'addition de ces deux courbes reproduit celle de la pulsation. — Il faut une autre méthode pour étudier la nature des autres détails de la pulsation. — Utilité des appareils artificiels.

Reprenons l'expérience décrite figure 23 sous le nom de myographie du cœur, en nous plaçant dans des conditions nouvelles. Au lieu de détacher le cœur de l'animal, laissons-le dans ses rapports normaux, et, découvrant seulement cet organe par une ouverture faite aux parois thoraciques, plaçons-le sous le levier du myographe (1). Le tracé que nous obtiendrons aura des caractères tout différents. Il est représenté dans la figure 37. Au lieu de la courbe simple et facilement reconnaissable de la secousse du muscle cardiaque, on observe des mouvements plus compliqués dépendant de l'arrivée et de la sortie du sang, combinées aux effets que produit l'action musculaire elle-même.

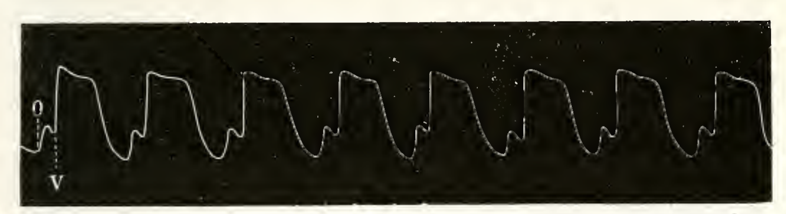


Fig. 37. — Tracé de la pulsation du cœur d'une grenouille dans les conditions normales de la circulation. O systole de l'oreillette. V début de la systole du ventricule.

Pour dédoubler ces deux influences, chargeons le levier myographique d'une petite masse de cire pesant à peine un gramme. Ce léger poids suffit pour vaincre la pression du

(1) Pour bien réussir il faut étendre la grenouille sur une plaque de liége en l'y maintenant avec des épingles. Cette plaque est elle-même fixée avec de la cire à modeler sur celle du myographe. L'immobilité de l'animal est ainsi assurée; on peut alors faire une expérience de longue haleine, telle que l'étude de l'action des poisons sur le cœur, ou toute autre dans laquelle il se produit de lentes variations des mouvements de cet organe.

sang dans le ventricule et pour aplatir cette cavité, en adossant les parois l'une à l'autre. Dès lors, on n'obtient plus que le tracé musculaire semblable à celui que donne le ventricule isolé et vide de sang (Voir figure 24).

Dans le tracé de la pulsation, il est facile de montrer que l'ondulation O tient à la systole des oreillettes qui gonflent les ventricules déjà un peu remplis depuis la fin de leur systole. Cette ondulation coïncide, en effet, avec le resserrement des oreillettes : ce que la lenteur des révolutions cardiaques permet facilement de saisir sur les cœurs de grenouille, surtout quand ils sont refroidis.

Reste à interpréter les autres éléments de la courbe d'une pulsation du cœur de la grenouille. A partir du point V, la systole ventriculaire est commencée ; pourquoi cette courbe ne présente-t-elle pas la forme à sommet arrondi qui caractérise l'acte musculaire de la systole ? Cela tient à ce que le levier n'obéit plus à l'épaississement des parois musculaires, mais au changement de pression du sang qu'elles compriment. — Or le resserrement des ventricules, s'effectuant sur un liquide qui s'échappe par les artères aussitôt qu'il a acquis une pression suffisante; cette pression atteint un maximum comme celle d'une chaudière à vapeur munie d'une soupape de sûreté.

On remarquera sans doute que la pression ventriculaire, devenant solidaire de la pression artérielle, devrait s'élever un peu, du commencement à la fin de la systole des ventricules, attendu que le système artériel, recevant à ce moment plus de sang qu'il n'en perd, doit acquérir une tension croissante ; c'est en effet ce qui arrive. Mais dans la pulsation du cœur de grenouille, ce changement de la pression intérieure qui croît graduellement est plus que compensé par une influence de sens contraire : la diminution de volume du ventricule qui se vide ; c'est pour cela que le sommet de la courbe présente une inclinaison descendante.

Pour faire la part de ces deux influences, il faut les isoler l'une de l'autre et montrer les phases que traversent : d'une part, le changement de la pression intérieure du ventricule;

d'autre part, le changement de volume de cet organe pendant la systole. La séparation de ces deux influences serait très-difficile à effectuer sur le cœur d'une grenouille; celui de la tortue se prête fort bien à cette analyse.

L'appareil déjà représenté (figure 30) va nous servir encore. Mais auparavant, recueillons le tracé complet de la pulsation cardiaque ; il fournira la figure 38 :

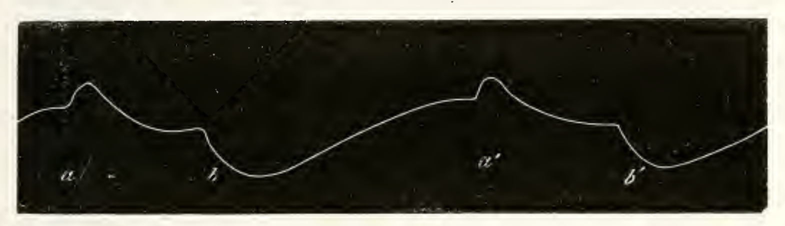


Fig. 38. — Tracé de la pulsation de la tortue. *a b* durée de la première systole ventriculaire. *b a'* diastole. *a' b'* seconde systole ventriculaire.

(Pour obtenir ce tracé, on a saisi le cœur de tortue entre un plan résistant et le levier horizontal du myographe).

Dans cette figure, la systole ventriculaire commence en *a*. La phase systolique présente une apparence qui rappelle celle de la pulsation du cœur de la grenouille. Sur ce tracé, on n'observe aucun effet de la systole de l'oreillette ; cette cavité était inerte, comme cela arrive souvent quand l'expérience dure depuis longtemps. La période diastolique du ventricule commence en *b*.



Fig. 39. — Courbe des changements de volume du cœur de tortue placé dans l'appareil décrit figure 30. — *a b* période de systole ventriculaire ; diminution du volume du cœur. *b' a'* période du diastole ; accroissement du volume par replétion.

Afin de savoir ce qui, dans cette courbe, tient aux *changements de volume* du cœur, plaçons cet organe dans le flacon destiné à inscrire, par le déplacement de l'air, la quantité de sang qui sort du cœur et celle qui y rentre (voyez *expérience*, p. 52), on obtient la figure 39 déjà connue, dans

laquelle *a b* exprime le resserrement systolique et *b a'* le gonflement ou réplétion diastolique.

Pour inscrire les *changements de consistance* des ventricules, c'est-à-dire les variations de la pression du sang qui y est contenu, il faudrait pouvoir introduire un manomètre dans leur cavité. Mais les dimensions trop exiguës de l'organe ne permettent pas d'employer ce moyen. On aura une idée très-approximative des changements de pression intra-ventriculaire en déprimant à l'aide d'un corps mousse, mais de faible surface, la paroi des ventricules. Selon les phases de la pression intérieure, le corps comprimant extérieur s'enfoncera et sera repoussé tour à tour. Si on inscrit ce mouvement, on obtient la courbe suivante, figure 40, dans laquelle *a b* représente la phase systolique et *b a'* la phase diastolique.



Fig. 40. — Courbe des changements de pression des ventricules, d'après la résistance que cet organe oppose à une compression de cause extérieure ; *a b* durcissement systolique croissant vers la fin de la systole; *b a'* mollesse qui accompagne la diastole.

Ce qui frappe dans cette courbe, c'est que la pression reste basse et sensiblement constante pendant le relâchement des ventricules.

Pendant la systole, au contraire, la pression est élevée et monte de plus en plus jusqu'à la fin de cette systole.

Ici se vérifie ce que nous disions tout à l'heure de la solidarité qui existe entre la pression ventriculaire et la pression artérielle, aussitôt que les valvules sigmoïdes sont ouvertes et que le ventricule ne fait avec les artères qu'une seule et même cavité. A ce moment, comme la pression s'élève dans le système artériel jusqu'à la fin de la systole, il faut que le sang éprouve, dans le ventricule, une élévation de pression parallèle (on verra plus tard ces effets encore plus nettement accusés sur le cœur des mammifères).

Maintenant que nous possédons les deux courbes séparées: celle des changements de volume des ventricules, et celle de changements de pression du sang dans ces cavités, combinons

ces deux influences, et nous devrons restituer la pulsation complète.

Rien de plus simple que d'ajouter ensemble les deux courbes ci-dessus. Sur la courbe des changements de volume, élevons une série d'ordonnées égales à celles de la courbe des changements de pression. Comme cette dernière ne s'élève que pendant la phase systolique et reste invariable pendant la diastole du cœur, les systoles *a. b.* et *a' b'* seront seules modifiées. La courbe totale, celle qui résulte de l'addition des deux autres, suivra, pendant les périodes systoliques, le tracé représenté par une ligne ponctuée, tandis que, pendant la diastole, elle ne sera modifiée en rien. Or, la nouvelle courbe, figure 41, n'est autre que celle que nous avons obtenue fig. 38, en inscrivant directement la pulsation cardiaque. Il est donc prouvé que cette pulsation résulte bien réellement de la double influence des changements de consistance et des changements de volume des ventricules.



Fig. 41. — Reproduction de la pulsation du cœur de la tortue par l'addition des courbes de changements de volume avec celles de changements de pression. — La ligne ponctuée est obtenue en ajoutant à la partie *a b* de la fig. 39, la portion *a b* de la fig. 40.

On obtient, en inscrivant la pulsation du cœur des grands mammifères, une nouvelle démonstration de cette double influence pour la production des tracés cardiographiques.

Les expériences faites sur ces animaux sont plus importantes que celles qui viennent d'être mentionnées, car elles correspondent à des tracés identiques à ceux que fournit le cœur de l'homme. Mais, pour être bien comprises, elles avaient besoin d'être éclairées par l'étude préalable de phénomènes plus simples, tels que ceux qu'on observe dans la circulation des animaux inférieurs.

Si le lecteur se reporte à la figure 12, et s'il examine les tracés de la pression intra-ventriculaire V et de la pulsation

cardiaque P, il éprouvera, je suppose, une facilité singulière à les comprendre. Dans le tracé de la pulsation, s'il néglige les vibrations valvulaires sur lesquelles j'aurai à revenir, il verra la pente descendante qui, pendant le durcissement systolique, exprime la diminution de volume du cœur. Il remarquera également que pendant la phase diastolique, l'accroissement de volume du ventricule qui s'emplit s'accuse, comme sur le cœur de tortue, par une élévation du tracé ; il constatera que dans la pression ventriculaire, on observe une uniformité à peu près parfaite, qui tient à ce que le sang s'échappe du ventricule par l'orifice aortique faisant l'office de soupape de sûreté ; enfin, si par la pensée il retranche de la pulsation cardiaque ce qui tient au changement de pression systolique, il retrouvera une courbe très-analogue à celle du changement de volume du cœur dont la figure 39, obtenue sur la tortue, donne le tracé.

Mais, pour rendre compte des éléments de la pulsation qui ne se trouvent que sur les mammifères et sont d'autant plus accusés que les mouvements du cœur sont plus rapides, il faut recourir à un autre ordre de preuves : à cette reproduction artificielle des phénomènes de la circulation cardiaque dont j'ai annoncé l'emploi.

C'est à l'aide d'un nouveau *schema* de la circulation que j'ai réussi à reproduire des tracés identiques à ceux de la pulsation du cœur de l'homme. En modifiant la construction de l'appareil, la force motrice dépensée pour le faire agir, la pression sous laquelle lui arrive le liquide et les résistances qu'il doit vaincre, j'ai réussi à obtenir une série de variétés de la pulsation qui se rencontrent chez l'homme et dont la signification devient ainsi facile à comprendre. Enfin les lésions des orifices peuvent être simulées au moyen de cet appareil artificiel et reproduire à la fois les bruits anormaux qu'elles entraînent et les principaux types des pulsations qu'on rencontre sur les malades.

VI. — Nouveau schéma de la fonction du cœur.

Premiers essais de schéma de la circulation; ils ne donnaient que des résultats partiels. — Moyen de reproduire avec ses phases véritables le mouvement de systole des ventricules; construction de la came qui engendre ce mouvement. — Moyen de graduer la force systolique de l'appareil: intermédiaires élastiques de forces variables. — Imitation de la systole de l'oreillette. — Disposition générale de l'appareil.

L'idée de Weber qui, le premier, imagina de reproduire, dans un système de conduits élastiques, les phénomènes de la circulation, me semble une de celles qui seront les plus fécondes en applications à la physiologie. J'ai décrit ailleurs (1) la disposition de ce schéma primitif qui, malgré sa construction grossière, rendait bien compte de certains phénomènes de la circulation du sang. L'invention moderne des tubes de caoutchouc et des membranes élastiques faites de cette même substance, a fourni le moyen de réaliser des appareils moins imparfaits. J'ai, moi-même, à plusieurs reprises, construit des schémas destinés à imiter certains détails de la circulation du sang; mais, suivant le but que je me proposais, je restreignais l'imitation à certains phénomènes, sacrifiant entièrement l'imitation des autres.

Ainsi, dans un premier appareil (2), pour reproduire les bruits du cœur, j'imitais, à la façon de Rouanet, les valvules et leurs claquements; mais le ventricule de mon appareil, placé dans un flacon de verre où de l'air était comprimé et raréfié tour à tour, était inaccessible au toucher; on ne pouvait donc percevoir sur ce schéma la pulsation cardiaque.

Dans un second appareil (3), je tentai de reproduire cette pulsation dans ce qu'elle a de plus saillant: à savoir le durcissement du ventricule au moment de la systole, et la coïncidence de la pulsation avec cette phase d'activité des ventricules.

Mais la forme de la pulsation était encore très-défectueuse; on peut s'en convaincre d'après la figure 42. Cela tenait à

(1) *Physiol. méd.*, p. 31.
(2) *Loc. cit.*, p. 164.
(3) *Journal de l'anat. et de la physiol.*, t. II, 1865, p. 417.

ce que, pour produire la systole des ventricules, j'agissais au moyen d'une force dont les phases ne répondaient pas à celle de l'effort systolique d'un ventricule véritable. Dans mon appareil, en effet, je me servais, à titre de force motrice, d'un lourd pendule qui, à la fin de chacune de ses oscillations, exerçait une traction passagère sur des cordages chargés de resserrer la poche ventriculaire. Or, un pareil mouvement ne ressemblait pas assez à celui qu'engendre le muscle cardiaque pour qu'on pût espérer une parfaite imitation des phases de la pression du sang dans le ventricule du cœur.

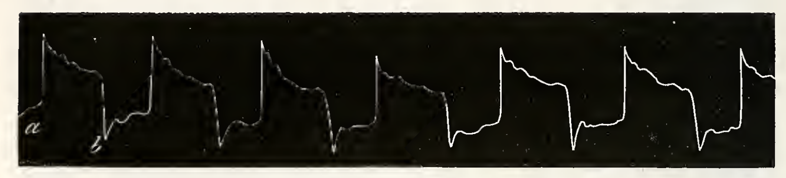


Fig. 42. — Tracés de la pulsation obtenus sur un schema imparfait en 1865; on constate seulement l'existence d'un durcissement ventriculaire, pendant la période systolique *a b*.

La reproduction parfaite de ces phases est le but que je me suis proposé dans la construction nouvelle dont on va lire la description. La myographie les fait connaître avec exactitude; elle montre que la fibre du cœur se raccourcit d'une manière assez brusque et revient plus lentement à sa longueur primitive. En un mot, dans la courbe musculaire du cœur, la systole est sensiblement plus courte que la diastole.

Lorsqu'on doit, en mécanique, reproduire un mouvement dont les phases varient d'une manière quelconque, le moyen le plus simple est d'employer une *came* qui, en tournant, soulève un levier qui repose sur elle et, suivant les variations de son excentricité, lui imprime un déplacement variable (1).

(1) La construction de cette came doit être basée sur la notion préalablement acquise de la forme du mouvement musculaire du ventricule, telle que la représente le tracé myographique du cœur.

Soit, figure 43, la courbe amplifiée d'une systole du cœur vide et de la diastole qui lui fait suite; on divise l'abscisse de cette courbe en un certain nombre de parties égales, 20 par exemple; à chacune de ces divisions on élève, jusqu'à la rencontre de la courbe, une série de perpendiculaires, chacune de ces ordonnées exprime l'étendue du mouvement de traction qui devra

Sur le bâti général de l'appareil schématique (fig. 45), est établi solidement l'axe de cette came commandé par une manivelle. Un volant placé sur cet axe assure l'uniformité de sa rotation et la parfaite ressemblance du mouvement produit avec celui qu'il s'agissait d'imiter.

Mais cela n'est pas encore suffisant pour reproduire, avec tous ses caractères, l'effort systolique développé par le muscle ventriculaire.

L'identité de deux actes musculaires suppose que les changements de longueur s'effectuent à chaque instant, non-seulement avec des *étendues égales* mais avec des *forces égales*. Or, on sait que la force d'un muscle est limitée, et que si le mouvement qu'il produit, dans une secousse, par exemple, présente une certaine forme lorsqu'il n'y a que peu de résistance à vaincre, la forme ne sera plus la même si la résis-

être opéré à une série de 20 instants successifs, pour produire un mouvement semblable, par sa forme, à celui que produit la fibre du ventricule en se raccourcissant.

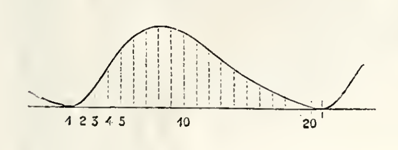


Fig. 43. — Courbe de la systole ventriculaire avec les 20 ordonnées qui serviront à la construction de la came.

Fig. 44. — Came destinée à reproduire les phases de la systole du ventricule.

Cette suite de raccourcissements devant être commandés par la came, celle-ci devra avoir, à chaque 20e successif de sa révolution, des excentricités égales ou proportionnelles à la série des ordonnées de la courbe.

Pour remplir cette condition, on prend une planchette au milieu de laquelle on inscrit un cercle, du centre duquel partent 20 rayons équidistants (fig. 44). L'un de ces rayons sera prolongé d'une quantité égale à la longueur de la première ordonnée de la courbe, le suivant le sera d'une quantité égale à la deuxième ordonnée et ainsi de suite jusqu'au 20e rayon dont le prolongement sera égal à la 20e ordonnée de la courbe musculaire du cœur. En réunissant entre elles les extrémités de toutes ces lignes, on obtiendra une courbe fermée sur elle-même. C'est suivant cette courbe qu'on devra faire passer le trait de scie qui découpera la came. L'axe de celle-ci traversera le centre du cercle primitivement tracé; quant au sens de la rotation qu'on devra imprimer à la came, il est commandé par l'ordre suivant lequel on aura construit la courbe;

tance à vaincre s'accroît (1). Cela tient à l'élasticité du muscle

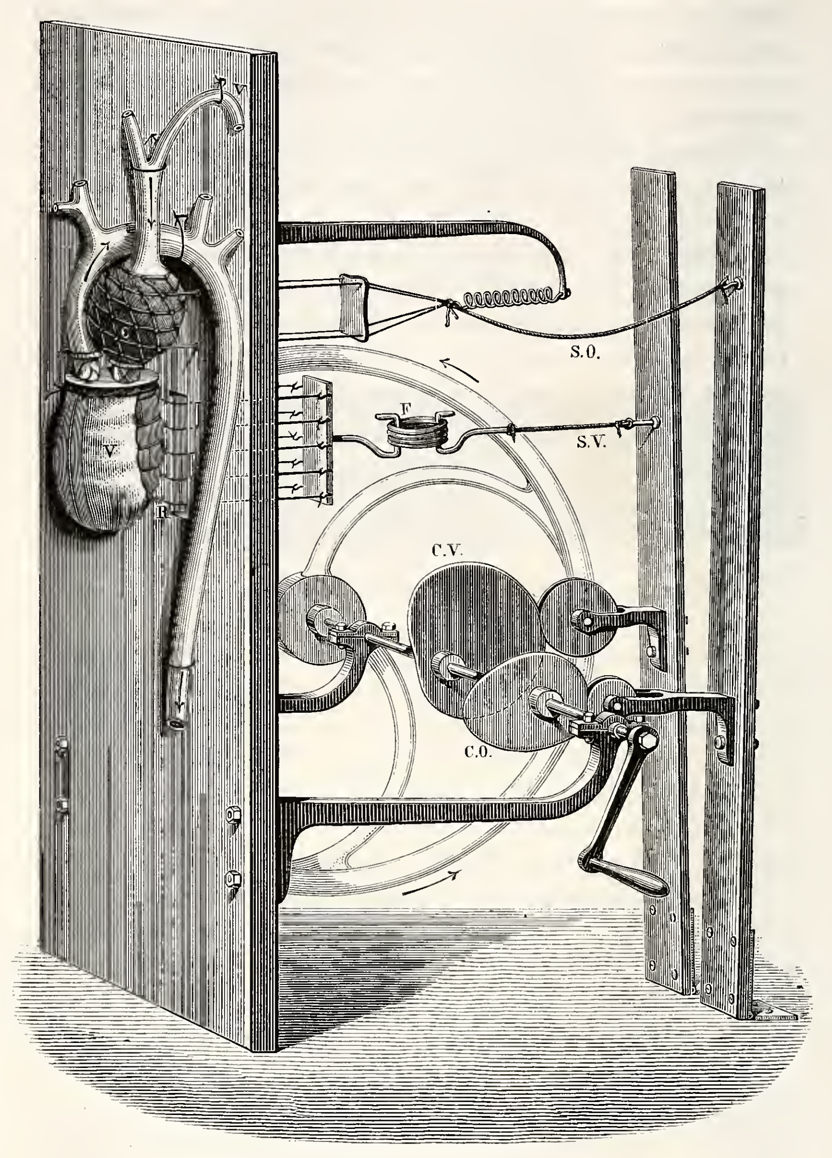


Fig. 45. — Schéma de la circulation du sang.

les points qui correspondent aux phases 1, 2, 3, etc., du tracé ventriculaire devant se présenter dans le même ordre à chaque tour de la came.

(1) Pour les modifications de la secousse musculaire par les obstacles, voir : *Du mouvement dans les fonctions de la vie*, p. 361.

qui, dans les cas d'effort insurmontable, se tend lui-même et ne produit aucun travail extérieur, tandis que si la résistance est surmontable, il se raccourcit d'autant plus que l'obstacle est moindre et subit d'autant moins d'allongement de son propre tissu. »

Explication de la figure 45.

Sur une planche verticale placée à gauche de la figure, sont disposés le cœur et les vaisseaux artificiels. — O, oreillette formée par une poche de caoutchouc que remplit sans cesse le liquide qui descend par les conduits veineux suivant la direction de la flèche. — V, ventricule réuni à l'oreillette par un large orifice muni d'une valvule ; le ventricule s'ouvre par un orifice muni de sigmoïdes artificielles dans un système de tubes élastiques dont la disposition rappelle grossièrement celle de l'aorte et des principaux troncs artériels. (Ces tubes, dont on n'a représenté que l'origine, se prolongent et se ramifient comme de véritables artères.)

La contractilité de l'oreillette et celle du ventricule sont imitées de la manière suivante : L'oreillette est logée dans un filet sur les mailles duquel tirent quatre cordons qui traversent la planche de l'appareil, cheminent parallèlement entre eux jusqu'à un petit rectangle au delà duquel ils se réunissent en un seul cordon qui s'attache à un ressort-boudin. Dans cette position, l'oreillette est seulement contenue dans le filet sans être comprimée. Une corde détendue SO produit la systole de l'oreillette au moment où elle se tend par le déplacement d'un levier vertical auquel elle est attachée. — Le ventricule est muni d'un plastron (de couleur blanche dans la figure), aux bords duquel sont fixés des cordons de tirage ; ceux-ci contournent la face postérieure du ventricule, s'entre-croisent avec les cordons qui viennent du bord opposé du plastron et se réfléchissant sur un rouleau R qui forme le bord d'une fente verticale, s'échappent derrière la planche et vont s'attacher, comme les cordons de l'oreillette, aux bords d'un rectangle de bois. Il y a donc deux fentes, dont l'une n'est pas visible dans la figure, et deux séries de cordons dont la traction simultanée produit un resserrement de la poche ventriculaire.

Le rectangle auquel s'attachent tous les cordons de tirage du ventricule est tiré en arrière par une corde SV qui produit la systole ventriculaire à un moment donné. Cette corde, interrompue sur son trajet, est munie de deux crochets que relient l'un à l'autre des anneaux de caoutchouc F. Grâce à cette disposition, la force avec laquelle se fait la traction sur les cordons est limitée par la force élastique du caoutchouc. En changeant le nombre des anneaux, on change la force de traction des cordons de tirage.

Les leviers verticaux, situés à droite de la figure, ont pour fonction d'agir sur les cordons SO et SV de l'oreillette et du ventricule. Munis

d'une charnière à leur extrémité inférieure, ils sont portés en arrière, d'un mouvement plus ou moins rapide, au moment où devra se produire la systole de l'oreillette ou du ventricule.

Une roue à gorge, portée par une chape adhérente au levier, roule sur le bord de la came quand celle-ci se met à tourner. Suivant le plus ou moins d'excentricité de la came aux différentes phases de sa rotation, le levier sera plus ou moins déplacé en arrière et exercera sur les cordons une traction plus ou moins étendue.

Les cames CV pour le ventricule, et CO pour l'oreillette, sont placées sur un même axe qu'une manivelle fait tourner. Un volant régularise le mouvement qu'une manivelle commande. Des flèches indiquent le sens de la rotation. On peut, dans certains cas, remplacer avantageusement la manivelle par une poulie et un moteur mécanique.

Telle qu'elle a été décrite, la came qui sert de moteur dans cet appareil n'aurait pas les propriétés voulues, si la traction provoquée par ses variations d'excentricité était transmise par des organes rigides, comme des cordes inextensibles. Dans ces conditions, le mouvement se ferait avec une force excessive. En cas d'obstacle à l'issue du liquide, la systole ventriculaire s'effectuerait avec la force entière du moteur employé à faire tourner la came, et si, pour cet usage, on se servait du bras d'un homme vigoureux, on développerait un effort hors de proportion avec celui que déploie le ventricule du cœur. Pour achever d'imiter les conditions physiologiques de la systole, il faut donc imiter non-seulement les changements de longueur du muscle, au moyen de tractions graduées sur les cordons de tirage, mais imiter également cette élasticité du tissu musculaire qui impose une limite à l'effort de raccourcissement. Il suffit, pour atteindre ce but, de rendre élastique la corde qui exerce la traction sur le ventricule. A cet effet, cette corde est rompue à sa partie moyenne F (fig. 45), et les deux bouts sont munis de crochets qu'on réunit l'un à l'autre par un ou plusieurs anneaux de caoutchouc.

Cette disposition présente ce grand avantage : qu'elle permet de régler à volonté la force du ventricule. Weber a montré que la force d'un muscle n'est autre qu'une force élastique, et que les phases différentes de l'effort musculaire ne sont que des variations du coefficient d'élasticité du muscle. Ces résultats ont été confirmés par Donders et Van Mansfeldt ; j'en ai

moi-même vérifié la parfaite exactitude. Or, si la force plus ou moins grande d'un muscle n'est que l'expression de son élasticité variable, rien n'est plus facile que de mettre la corde de traction dans les conditions d'un muscle fort ou faible ; il suffit de placer un plus ou moins grand nombre d'anneaux de caoutchouc sur les deux crochets en F: la force du mouvement engendré par la came croîtra en raison du nombre de ces anneaux. On pourra ainsi produire des systoles passant toutes par les mêmes phases d'intensité relatives, mais déployant des efforts plus ou moins considérables.

Quant à la systole de l'oreillette, elle est obtenue, dans le schéma, par une autre came CO dont la forme, en ellipse allongée et très-excentrique, permet d'obtenir un mouvement de durée très-courte, comme celui qui appartient à la systole de l'oreillette O (figure 25). Pour cela, on relie avec l'oreillette le levier qui transmet l'action de cette came, au moyen d'une corde SO qui ne se tend qu'un instant très-court : au moment de l'excentricité maximum. Il faut ensuite placer la systole de l'oreillette au moment où elle doit avoir lieu dans la révolution d'un cœur véritable. Cela s'obtient en faisant tourner la came de l'oreillette autour de l'axe qui lui est commun avec celle du ventricule, jusqu'à ce que la systole auriculaire se produise au moment voulu.

Il est à peu près inutile de reproduire la description des autres détails de l'appareil : c'est l'imitation d'un cœur simple présentant une seule oreillette et un ventricule unique. Les veines sont imitées par un tube afférent qui verse dans l'oreillette le liquide puisé dans un réservoir plus ou moins élevé, à peu près comme cela se voit dans la figure 30 ; l'orifice auriculo-ventriculaire est muni d'une valvule, et l'orifice aortique en porte une à triples clapets, construite sur le modèle des sygmoïdes de l'aorte ; ces détails se voient plus clairement dans la figure 46. L'aorte elle-même se recourbe en crosse et émet des branches multiples qui, après des trajets variés, rappelant fort grossièrement ceux des artères humaines, viennent, par des ajutages étroits, se verser dans le réservoir veineux. (Pour simplifier la figure 45, on a représenté l'aorte et ses branches coupées après un court trajet.)

Sur la paroi du ventricule de l'appareil, on applique l'explorateur de la pulsation cardiaque (explorateur à tambour), et l'on recueille un tracé, identique à celui que donnerait la pulsation du cœur d'un homme. Cette ressemblance est assez parfaite pour qu'on puisse admettre l'identité des phénomènes mécaniques produits de part et d'autre. On verra, par les expériences ultérieures, que sur ce point le doute n'est pas possible.

VII. — Vérification du schéma.

Disposition de l'appareil pour obtenir les tracés de la pression dans l'oreillette et dans le ventricule, en même temps que la pulsation du cœur et le pouls aortique. — Tracés obtenus; leur analyse: ils sont identiques à ceux qu'on obtient sur les animaux. — Nouvelles preuves expérimentales; rôle de l'oreillette; action du ventricule; signe du resserrement ventriculaire tiré de la forme de la pulsation; variation de la vacuité post-systolique et du flot de l'oreillette.

Avant d'étudier sur le schéma quelles influences font varier les différents actes d'une révolution du cœur et en particulier la pulsation, j'ai dû m'assurer d'abord que l'appareil fonctionnait bien et qu'il reproduisait l'ensemble des phénomènes que la *cardiographie physiologique* signale sur les grands animaux. Sauf des différences de force ou de fréquence des mouvements, un bon schéma doit fournir les mêmes tracés que le cœur d'un cheval.

La figure 46 montre la disposition de l'expérience.

On introduit dans l'oreillette O l'ampoule d'une sonde cardiaque dont le tube passe par un conduit veineux et porte à l'enregistreur les variations de la pression dans l'oreillette.

Une autre ampoule semblable est placée dans le ventricule V, d'où son tube s'échappe, par un conduit ménagé à cet effet, et se rend à un second levier inscripteur.

Un explorateur à tambour E, presse sur le ventricule et recueille la pulsation qu'il transmet à un troisième inscripteur. Enfin, une sonde introduite dans l'aorte fournit l'indication du pouls aortique.

Les quatre tracés recueillis à la fois donnent la figure 47.

Le premier mouvement qui se voit sur ces tracés (à gauche de la figure) est une systole de l'oreillette. La ligne verticale 1, prolongée à travers les autres courbes, permet de suivre les effets de cette systole dans le tracé du ventricule V et

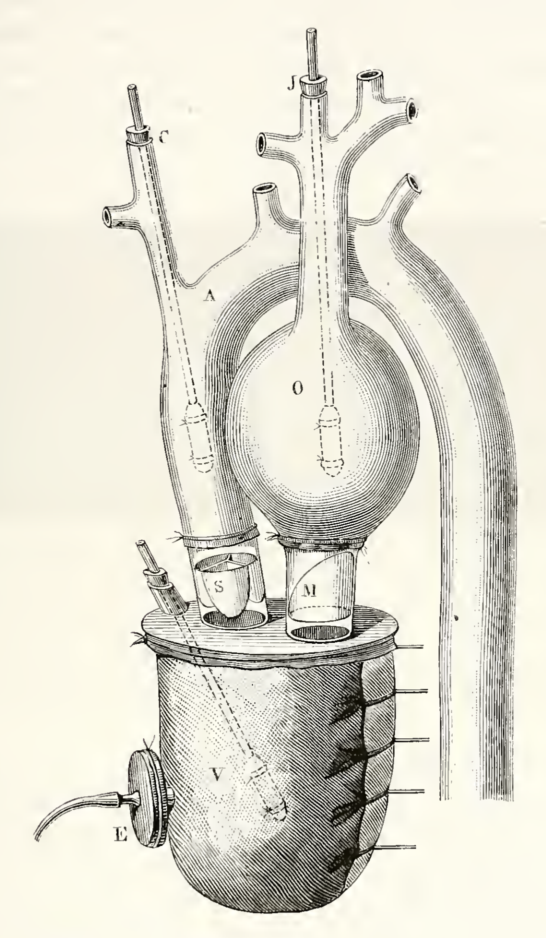


Fig. 46. — Disposition du schéma pour reproduire les tracés de la cardiographie physiologique.

dans celui de la pulsation cardiaque. Dans les courbes V et P, le synchronisme de la petite ondulation auriculaire avec la systole de l'oreillette, c'est-à-dire avec le maximum d'élévation de la courbe O, est manifeste.

Le phénomène qui se produit à l'instant n° 2, est le début de la systole ventriculaire. Le mouvement est ici moins brusque que chez les mammifères ; en effet la came qui, dans le schéma, commande le mouvement systolique du ventricule a été construite sur le type de la systole de la tortue (1). Dans le ventricule, la pression s'élève et reste élevée pendant toute la durée de la systole, gardant une valeur à peu près constante ; puis elle s'abaisse, annonçant que la systole est finie. On remarque la concordance parfaite du début et de la fin de la systole ventriculaire avec le début et la fin de la pulsation du cœur Mais, dans la pulsation, le tracé s'abaisse

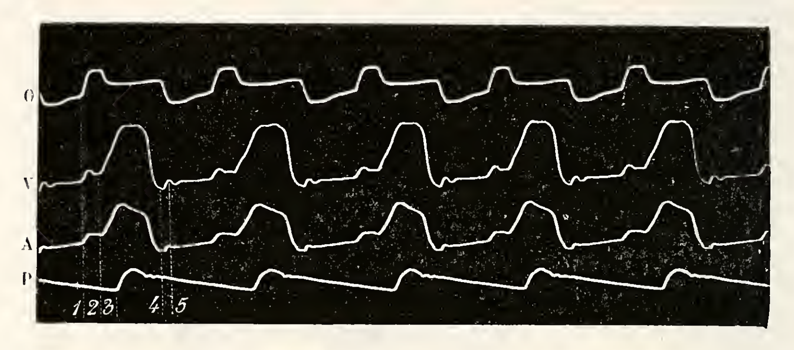


Fig. 47. — Reproduction sur le schéma des tracés obtenus dans la cardiographie physiologique (Fig. 12), ainsi que du pouls aortique O, tracé de l'oreillette; V ventricule; P pulsation du cœur; A, pouls aortique (Héliogravure).

du commencement à la fin de la phase systolique. Cet abaissement tient à la diminution de volume du ventricule qui se vide.

L'acte qui se produit à l'instant n° 3 est le pouls aortique. On remarque le retard de cette pulsation sur le début de la systole du ventricule. Ce retard ne tient pas seulement à la lenteur de propagation de l'onde sanguine, il est dû aussi à ce que la pression dans le ventricule doit acquérir une certaine intensité pour surmonter celle du sang aortique qui presse sur les sygmoïdes ; alors seulement le sang peut passer du ventricule dans l'aorte et le pouls se produire dans les artères même les plus rapprochées du cœur. Ce retard qui

(1) Je me propose de construire prochainement un nouveau schéma avec différents perfectionnements, entre autres une série de cames donnant, à volonté, différentes formes systoliques.

s'observe également sur les animaux est peut-être un peu plus prononcé sur le schéma, à cause de la lenteur un peu trop grande du resserrement ventriculaire. Le pouls aortique présente la trace de la vibration des valvules sigmoïdes 4 ainsi qu'on l'observe chez les animaux et sur l'homme.

Dans le tracé de l'oreillette, on constate, après la systole de cette cavité une élévation de pression qui dure pendant toute la systole des ventricules et qui tient à ce que la valvule mitrale fermée ne laisse pas sortir le sang de l'oreillette.

On n'observe pas, comme dans les tracés obtenus sur les animaux, ces ondulations que nous avons attribuées aux vibrations des valvules auriculo-ventriculaires; c'est qu'en effet la disposition des valvules du schéma ne se prête pas à ce genre de vibrations (1). Du reste ces vibrations ne s'observent, ni dans le tracé de la pression ventriculaire, ni dans celui de la pulsation. Cette absence de vibrations valvulaires est la seule différence qui existe entre les tracés artificiels et les tracés naturels.

Quand la systole du ventricule est finie, la courbe de pression du sang est à son minimum dans cette cavité. Il existe alors une déplétion 4 que je nommerai le *vide post-systolique* quand je la désignerai plus tard. Ce vide est bientôt comblé par l'arrivée du sang qui vient de l'oreillette. Un flot de sang tombe dans le ventricule et signale son arrivée par un soulèvement brusque du tracé 5. C'est ce que nous désignerons sous le nom de *flot de l'oreillette;* au moment où ce phénomène se produit, on peut voir qu'il se fait un abaissement soudain de la pression dans l'intérieur de l'oreillette dont le sang s'échappe abondamment dans le ventricule.

Le tracé de la pulsation cardiaque offre, comme celui de la pression ventriculaire, le vide post-systolique et le flot de l'oreillette, ce qui est tout naturel, puisque les changements de pression du sang s'accusent, dans la pulsation, par les changements qu'ils produisent dans la consistance des ventricules.

Enfin, dans les trois tracés supérieurs, le reste de la diastole se traduit par une ascension lente de la courbe, ce qui exprime

(1) Les valvules du schéma sont faites de petits sacs de taffetas imitant une valvule de veine; elles sont très-peu extensibles et ne forment pas de voussure du côté de l'oreillette.

la réplétion lente et graduelle des différentes cavités du cœur sous l'influence de l'abord continuel du sang veineux. Puis, une nouvelle systole de l'oreillette arrive, signalant le début d'une nouvelle révolution du cœur.

A partir du moment où les valvules sygmoïdes se ferment, ce qui s'accuse dans le tracé du pouls aortique par une petite ondulation, on voit que la pression baisse graduellement dans le système artériel, par l'effet de l'écoulement du sang qui passe des artères aux veines, à travers les vaisseaux capillaires. Ainsi, dans le système vasculaire, la pression baisse pendant la durée du repos du cœur, tandis qu'à l'intérieur du cœur lui-même, la pression s'élève par l'afflux du sang veineux.

En faisant cette analyse des tracés obtenus sur le schéma, j'ai eu pour but de montrer que la même interprétation s'applique aux tracés artificiels et à ceux que donne le cœur des animaux. L'inspection de ces deux sortes de courbes suffirait à donner cette conviction, pourvu qu'on ait l'habitude de lire des tracés. Mais on ne considérera peut-être cette similitude des courbes que comme une présomption en faveur de l'identité du mécanisme qui les produits. Peut-être exigera-t-on des preuves expérimentales de l'exactitude des interprétations qu'on vient de lire. Ces preuves seront d'autant plus faciles à fournir que le schéma se prête à toutes sortes de modifications: supprimer tel ou tel mouvement, en accroître ou en diminuer l'énergie ou la durée, créer ou supprimer des résistances au devant du courant sanguin, etc., tout cela se produit à volonté et l'on peut juger aussitôt des changements du tracé qui correspondent à ces changements de la fonction.

Nous allons passer en revue une série de ces influences expérimentales qui servent de contrôle à l'interprétation des tracés ci-dessus.

Action de l'oreillette. — Nous avons attribué à la systole de l'oreillette l'ondulation qui arrive à l'instant n° 1, dans le tracé supérieur O fig. 47, et qui retentit, sous forme d'une ondulation analogue mais plus faible, dans les tracés V et P. Pour démontrer la réalité de cette cause, il faut supprimer la systole

de l'oreillette; on devra voir disparaître toutes les ondulations qu'elle produit dans les autres tracés. Or, quand on coupe la corde SO (fig. 45) par laquelle se transmet à l'oreillette l'action périodique de la came qui la commande, toutes les ondulations disparaissent et l'on n'a plus que des tracés dépourvus de systoles auriculaires. Il n'existe plus alors dans l'oreillette que l'accroissement passif de la pression qui se produit pendant la systole ventriculaire sous l'influence de la rétention du sang qui vient du système veineux (1).

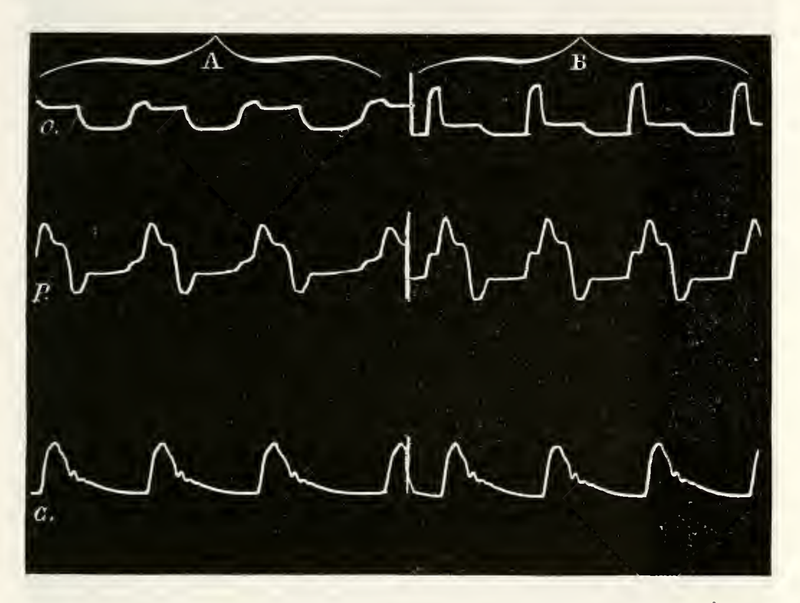


Fig. 48. — Montrant l'action de l'oreillette dont la force systolique a été accrue dans la 2e moitié du tracé, en B.— O, tracé de l'oreillette; la phase systolique est plus haute dans la moitié B de la figure. — P, pulsations du cœur; on voit que les effets de la systole de l'oreillette sont plus marqués dans la moitié B. — C, pouls carotidien, indifférent aux influences de l'oreillette (Héliogravure).

Inversement, on peut donner plus d'énergie à la systole de l'oreillette en raccourcissant la corde qui lui transmet l'action

(1) Les tracés V et P dépourvus de la systole auriculaire ne constituent pas, du reste, une forme insolite chez l'homme et chez les animaux supérieurs. Souvent, tout effet de la systole auriculaire manque dans le ventricule; cela tient à la grande faiblesse de cette systole. Chez les animaux inférieurs, on la voit souvent disparaître avec une grande facilité. Ainsi, dans le tracé de la tortue représenté (fig. 38) les effets de la systole de l'oreillette dans la pulsation ont disparu.

de la came. Il s'en suit une exagération des effets de l'oreillette dans les tracés O P. La figure 48, dans sa deuxième moitié, montre l'effet d'une augmentation de la force systolique de l'o-

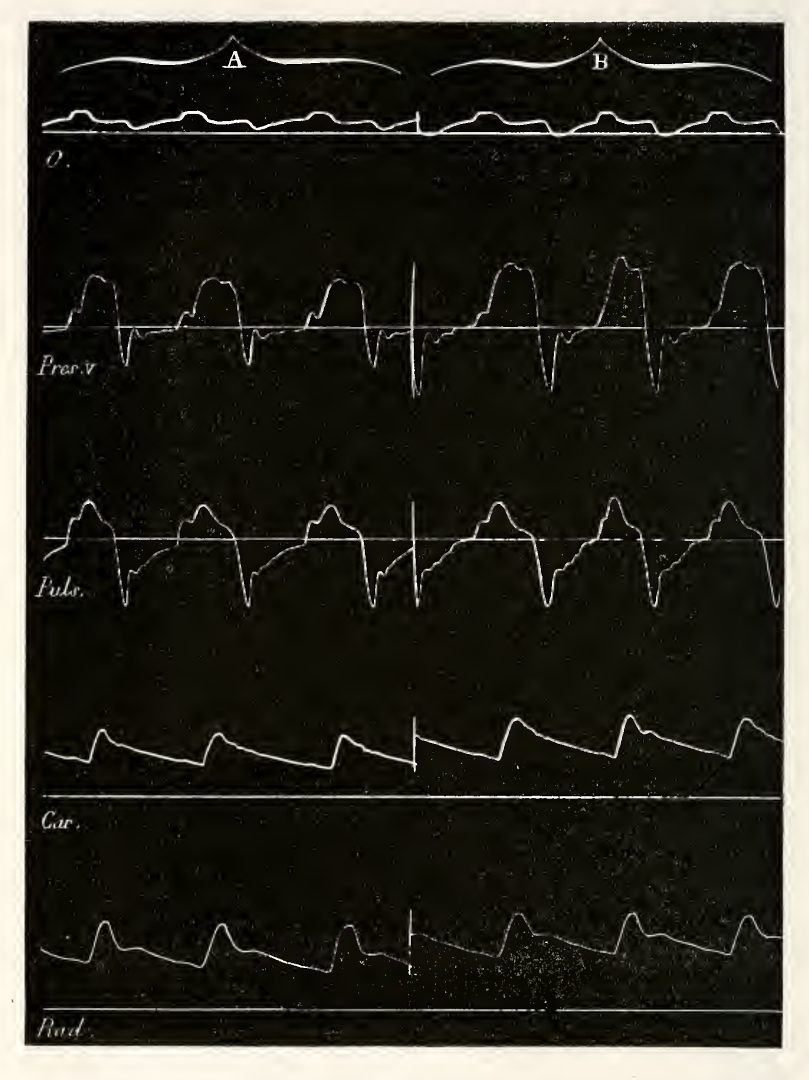


Fig. 49.— Moitié A, force moyenne du ventricule. Moitié B, force considérable du ventricule. Effets de ces changements de force sur tous les tracés à la fois (Héliogravure).

reillette, ce qu'on a obtenu en raccourcissant la corde SO

(fig.45). Non-seulement on amplifie l'effet de la systole de l'oreillette dans le tracé O pris dans cette cavité, mais on accroît l'effet de la systole auriculaire dans le tracé P de la pulsation cardiaque. Quant au tracé aortique A; on devait s'attendre à ne voir aucune modification dans sa forme.

Action du ventricule. — On peut employer la même méthode pour s'assurer que c'était bien l'action du ventricule qui se traduisait, figure 45, dans les tracés V et P, sous forme de courbes dont le début est marqué par la ligne verticale n° 2. En rompant la communication de la came avec le ventricule, on supprime tout effet de la systole et l'action de l'oreillette subsiste seule. En accroissant ou en diminuant la force de la systole ventriculaire, on accroît l'amplitude de ses effets dans les courbes V et P, ainsi que celle du pouls carotidien et radial.

On a vu que pour changer la force du ventricule, il suffit de changer le nombre des anneaux de caoutchouc dont la force élastique imite, dans le schéma, la force du ventricule. On obtient ainsi des systoles fortes ou faibles.

Sous ces influences, le pouls augmente ou diminue d'amplitude ainsi qu'on pouvait le prévoir.

Dans la figure 49, la moitié A est obtenue avec une force moyenne des systoles ventriculaires ; la moitié B, avec une force plus grande. Or, dans cette seconde moitié, la hauteur des tracés qui expriment la pression intra-ventricuiaire est plus considérable que dans la première. D'autre part l'accroissement de la hauteur du pouls carotidien, aussi bien que du pouls radial, prouvent également cette augmentation de l'énergie systolique du ventricule.

Resserrement systolique. — En analysant la figure 47, nous avons attribué à la diminution de volume du ventricule la pente descendante que présente la courbe systolique dans le tracé de la pulsation P. Si cette interprétation est vraie, on devra voir cette pente s'accentuer plus ou moins, suivant que le ventricule se vide d'une manière plus ou moins parfaite. Or, en faisant varier la force systolique, on doit en faire varier les effets sur le mouvement du sang. Une systole forte devra s'ac-

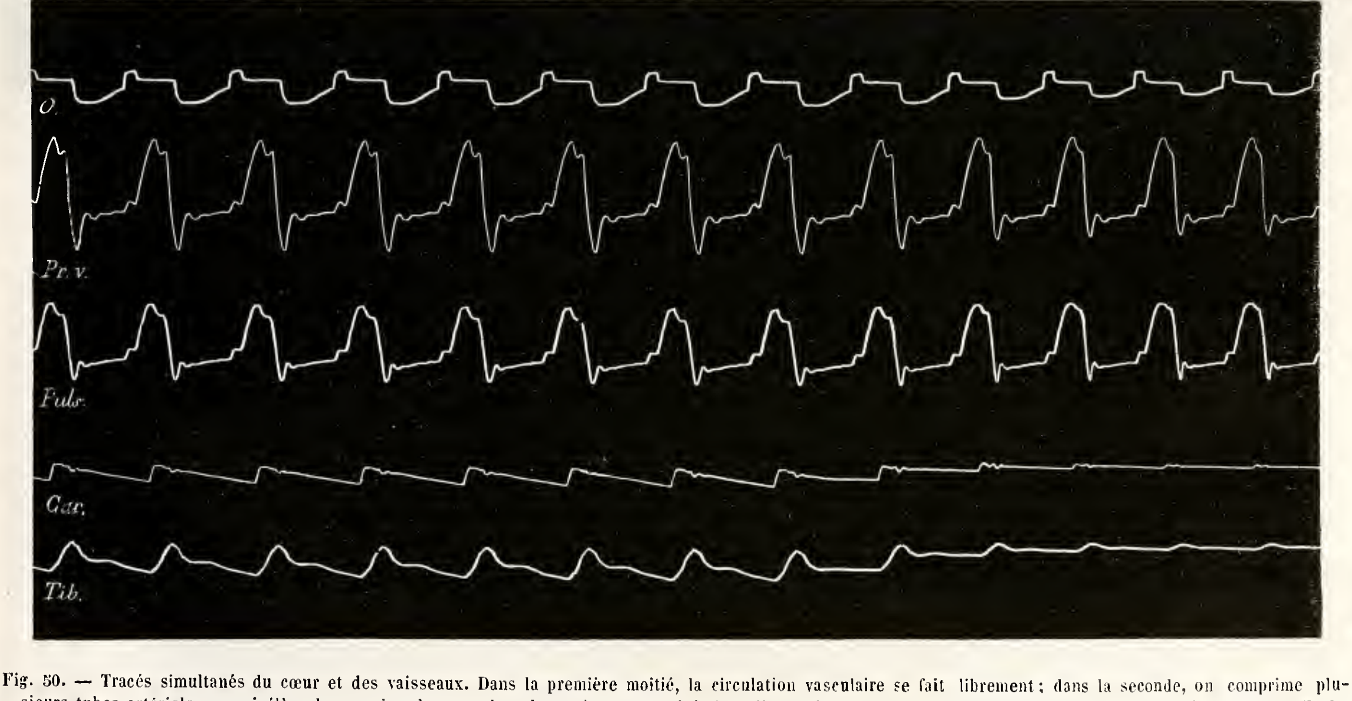


Fig. 50. — Tracés simultanés du cœur et des vaisseaux. Dans la première moitié, la circulation vasculaire se fait librement ; dans la seconde, on comprime plusieurs tubes artériels, ce qui élève la pression du sang dans les artères et produit les effets suivants. — O, l'oreillette se vide moins complètement. *Pr. V.* La pression intra-ventriculaire tombe moins bas à la fin des systoles (vide post-systolique moindre). *Puls.* La pulsation cardiaque offre à son sommet une pente moins inclinée, ce qui exprime une évacuation moins abondante. — *Car.* et *Tib.* Le pouls des artères gagne en hauteur et perd en amplitude (Héliogravure).

compagner d'une évacuation plus complète, c'est-à-dire d'une diminution plus prononcée du volume du ventricule et sur le tracé, on verra une pente plus inclinée du sommet de la pulsation.

C'est ce qui arrive en effet ; on en peut juger en comparant la forme des pulsations du cœur dans la figure 49 (1re moitié A), systole faible et (2e moitié B) systole forte.

Le raisonnement nous apprend encore que le ventricule, à force égale de sa systole, devra se vider plus ou moins, suivant que la sortie du sang, par l'orifice aortique, sera plus ou moins facile ; en d'autres termes, suivant que la tension artérielle sera petite ou grande. Pour obtenir une élévation de la pression dans les artères du schéma, oblitérons quelques-uns des tubes qui laissent passer le liquide des artères dans les veines ; nous constatons aussitôt (fig. 50) que la pression du sang s'élève, ainsi que l'exprime la hauteur croissante du tracé des pulsations carotidiennes et tibiales. Or, dans ces conditions, on peut voir que la pulsation accuse, par la pente de sa courbe systolique, des différences dans le changement de volume du ventricule. La pente, moins inclinée, pendant que la tension artérielle est forte, annonce que le ventricule se vide moins ; cette pente, au contraire, s'inclinerait davantage si la tension artérielle baissait et permettait au ventricule de se vider plus complétement.

Vacuité post-systolique. — La dépression soudaine qui s'accuse, à la fin de la systole, dans les tracés V et P (fig. 47), nous l'avons attribuée à l'effet de l'évacuation ventriculaire. Le ventricule, en effet, ne doit jamais avoir une pression plus basse que lorsqu'il vient de se vider. Mais si la dépression dont il s'agit tient réellement à cette cause, il est clair qu'elle sera plus ou moins profonde, suivant que le ventricule se sera vidé d'une manière plus ou moins complète. Après une systole énergique (moitié B, fig. 49), la dépression sera plus profonde qu'après une systole faible (moitié A de la même figure).

Elle sera plus profonde aussi dans le cas où une pression artérielle faible aura permis au ventricule de mieux se vider. On peut s'assurer qu'il en est ainsi en effet, l'examen de la

ligne *Press. V*, fig. 50, suivant que l'écoulement artériel est libre ou entravé, en fournit la preuve.

Le flot de l'oreillette s'accuse, avons-nous dit, par un soulèvement brusque de la courbe, au moment où la dépression post-systolique cesse d'exister. Ce flot fera irruption avec d'autant plus de force et s'accusera par un soulèvement d'autant plus prononcé dans la courbe, que l'évacuation ventriculaire aura été plus complète. On peut juger sur les figures précédentes, 49 et 50, qu'il en est réellement ainsi.

Enfin, le schéma permet de ralentir la pénétration du flot de l'oreillette et de lui enlever la brusquerie qu'il présente dans les conditions normales. Il faut, pour cela, produire un rétrécissement de l'orifice auriculo-ventriculaire, ce qu'on obtient aisément en invaginant avec le doigt la paroi de l'oreillette, de manière à oblitérer partiellement l'orifice auriculo-ventriculaire. La vacuité post-systolique n'est alors comblée que d'une manière graduelle par l'arrivée du sang de l'oreillette : figure 51, en B.

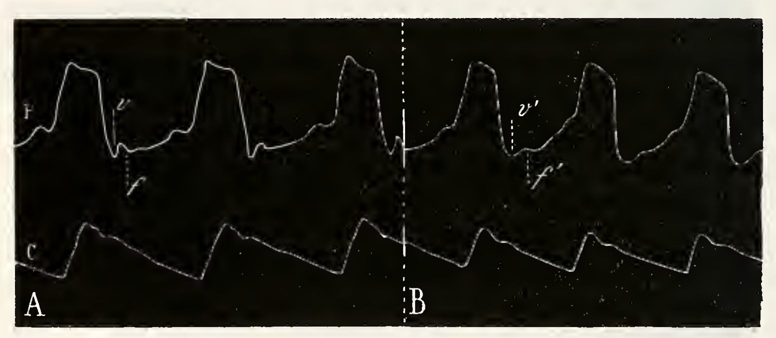


Fig. 51. — Effets d'un rétrécissement de l'orifice auriculo-ventriculaire sur la pulsation cardiaque. — P, tracé de la pulsation. — C, tracé du pouls carotidien. — A, (1re moitié du tracé) type normal. B, (2e moitié) effets du rétrécissement auriculo-ventriculaire. — v et v' vide post-systolique; f et f' flot de l'oreillette.

Ces études préliminaires auront, je l'espère, dissipé les doutes qui pourraient rester encore sur la réalité des interprétations des tracés cardiographiques. Peut-être le lecteur a-t-il entrevu la direction nouvelle que ces recherches doivent recevoir à l'avenir.

Si la pulsation du cœur traduit l'état de la circulation cardiaque en indiquant, à tout instant, la manière dont le ventri-

cule se vide et se remplit, elle deviendra une source de renseignements utiles pour les physiologistes et les médecins. Il n'est pas douteux que les affections organiques du cœur ne se traduisent par des caractères graphiques d'une importance égale à ceux que l'auscultation nous livre. Aussi, ai-je, depuis longtemps, essayé de rassembler des tracés recueillis dans les différents états physiologiques et pathologiques.

Si je n'ai publié jusqu'ici que très-peu de chose au sujet des applications pratiques de cette méthode, cela tient aux difficultés nombreuses que présente ce genre de recherches. On pourrait croire que les lésions organiques du cœur doivent se révéler avec des caractères très-nets; mais ces lésions sont si rarement pures que la complexité de leur nature se retrouve dans les tracés. N'est-il pas très-rare de rencontrer une lésion qui, non-seulement se borne à l'un des orifices du cœur, mais qui ne frappe cet orifice que de rétrécissement ou d'insuffisance, sans mélange des deux effets? En outre, pour n'accepter comme valables que les cas suivis d'examen nécroscopique, on doit écarter un grand nombre de ceux qu'on a pu recueillir. Ajoutons que, dans ces cas même, il faut que l'autopsie ait été faite peu de temps après qu'on a recueilli le tracé, car les lésions organiques se modifient souvent avec une rapidité extrême, et la lésion constatée par l'examen cadavérique pourrait ne plus correspondre à l'état du malade au moment où il a fourni le tracé.

Toutefois, l'emploi du schéma semble devoir abréger beaucoup les recherches pathologiques dont je viens de parler. On peut, sur l'appareil artificiel, produire des troubles bien déterminés du mécanisme cardiaque : faire subir à ses orifices des rétrécissements et des insuffisances absolument purs. Si la modification que ces lésions artificielles entraînent dans les caractères de la pulsation se retrouve au lit d'un malade, si les signes fournis par l'auscultation pendant la vie et l'examen nécroscopique s'accordent pour faire admettre l'existence d'une même lésion, liée à certaines formes du tracé, alors, ce concours de preuves devient extrêmement démonstratif et permet, sur un nombre restreint d'observations cliniques, de baser des conclusions qui ne soient pas trop téméraires. Mais, je le répète, ces cas sont encore peu nombreux et ce n'est

guère que pour l'insuffisance aortique, l'insuffisance tricuspide et certains anévrysmes, qu'on pourrait aujourd'hui assigner des caractères précis empruntés à la méthode graphique.

Bien plus facilement s'obtiendra la signification physiologique des différentes formes de la pulsation cardiaque ; aussi, dans un prochain mémoire, essayerai-je d'exposer les différents types qu'on rencontre sur l'homme sain et dont la connaissance est le point de départ obligé de toute application à la pathologie.

En terminant ce premier travail, que j'ai été forcé d'étendre plus que je n'aurais voulu, je résumerai, sous forme de conclusions, les points principaux qui en ressortent.

CONCLUSIONS.

1° Les interprétations que Chauveau et moi avions autrefois données sur la signification des tracés du cœur du cheval peuvent être appliquées à la connaissance de la circulation cardiaque chez l'homme.

2° On peut recueillir presque toujours sur l'homme un tracé de la pulsation cardiaque, en se servant d'appareils inscripteurs sensibles et d'un explorateur spécial. Le meilleur, jusqu'ici, est celui que je désigne sous le nom d'explorateur à tambour.

3° Le cylindre dont on se sert pour l'inscription de la pulsation cardiaque doit avoir une vitesse de 1 centimètre 1/2 par seconde ; c'est du moins la vitesse qui convient à la plupart des cas.

4° Certains doutes ont été émis, relativement à la fidélité

des tracés du cardiographe. Ainsi, le professeur Fick a trouvé d'autres valeurs que nous, pour la pression du sang dans le cœur et dans l'aorte. Cela tient à la nature des instruments qu'il employait : instruments dont les indications n'étaient pas assez rapides. La transmission par l'air est à l'abri d'un pareil danger.

5° L'interprétation des tracés de la pulsation cardiaque n'a pas paru suffisamment démontrée à certains physiologistes, c'est pourquoi j'ai essayé de l'appuyer de preuves nouvelles. Ces démonstrations m'ont conduit à analyser la pulsation, dans son origine musculaire et dans les conditions mécaniques qui la modifient.

6° Le cœur, considéré comme muscle, présente, avec les autres organes musculaires, des analogies qui n'apparaissent pas au premier abord.

7° La systole brève de l'oreillette et celle du ventricule qui est sensiblement plus longue, ne doivent pas être assimilées à des *contractions*, mais à des *secousses*, c'est-à-dire à l'acte le plus simple que puisse effectuer un muscle. Il faut donc rejeter l'expression de contraction du cœur pour exprimer sa systole.

A l'appui de cette théorie concourent des preuves de divers ordres : les unes, tirées de la forme de la systole qui est celle de la secousse, les autres, empruntées à l'action du chaud et du froid sur le muscle cardiaque, au temps perdu qui précède la systole comme la secousse d'un muscle; enfin, aux phénomènes de contraction secondaire ou induite : la systole d'un cœur, en effet, n'induit qu'une secousse dans un muscle de grenouille.

8° Les phénomènes mécaniques qui produisent la pulsation cardiaque sont intimement liés au mouvement du liquide à l'intérieur du cœur ; la pulsation n'a pas la même forme sur un cœur vide que sur un cœur dans lequel le sang circule.

9° Dans les conditions de la circulation du sang, la pulsation du cœur se compose de deux éléments principaux qui se

combinent pour lui donner naissance. Ce sont : 1° les changements de volume du cœur suivant qu'il se vide ou se remplit ; 2° les changements de consistance du ventricule suivant le degré de pression auquel le sang est soumis à son intérieur par les resserrements et relâchements alternatifs des parois ventriculaires. Sur certains animaux, la tortue, par exemple, on peut isoler ces deux influences pour l'analyse de la pulsation du cœur.

10° Les changements de volume du cœur s'inscrivent au moyen d'un appareil à déplacement d'air. Les changements de pression intérieure, au moyen de sondes cardiaques, de sphygmoscopes ou même d'explorateurs de la consistance du ventricule.

11° Quand on ajoute géométriquement le tracé des changements de volume du cœur à celui des changements de consistance, on reproduit le tracé de la pulsation cardiaque.

12° La méthode de Ludwig, avec certaines modifications, permet d'estimer le débit du cœur en un temps donné et de constater que, dans la plupart des cas, le volume des ondées que lance le ventricule diminue quand la fréquence des systoles augmente.

13° Pour déterminer la cause de certains détails de la pulsation qui manquent chez les animaux inférieurs, j'ai construit des appareils mécaniques au moyen desquels on peut reproduire plusieurs de ces détails.

14 Comme point de départ de la construction d'un bon appareil schématique, il faut imiter les caractères de l'acte musculaire qui constitue la systole des cavités du cœur. — On imite la *forme* du raccourcissement musculaire au moyen d'une *came*, et on reproduit les caractères de *force* de ce mouvement, en le transmettant au moyen d'un intermédiaire élastique.

15° Avec mon nouveau *schéma*, on peut reproduire tous les

phénomènes de la circulation cardiaque : ses bruits, sa pulsation et le pouls des artères. Si l'on inscrit ces phénomènes, on obtient des courbes assez approchées de celles que fournit la cardiographie sur les animaux, pour qu'il ne puisse y avoir de doute sur la parfaite analogie des phénomènes artificiellement obtenus avec ceux qu'on observe sur l'animal ou sur l'homme.

16° On obtient, sur l'appareil artificiel, le contrôle de toutes les théories émises sur la signification des principaux éléments de la pulsation du cœur. Pour cela, il n'est besoin que de modifier dans un certain sens la fonction de l'appareil ; on voit aussitôt se produire, dans les tracés, les changements que la théorie faisait prévoir.

17° L'emploi de l'appareil artificiel sera d'un grand secours pour l'étude des caractères cliniques de la pulsation. Il permet, en effet, de reproduire artificiellement les différentes lésions des orifices du cœur, et fait ainsi prévoir les caractères que la pulsation devra présenter sur l'homme, dans le cas où existeront les mêmes lésions organiques.



III.

MOUVEMENT DES ONDES LIQUIDES.

POUR SERVIR A LA THÉORIE DU POULS.

I. — Nature des ondes liquides.

Le retard du pouls et son rebondissement ou *dicrotisme*, ne peuvent s'expliquer que par un mouvement ondulatoire. — Théorie générale des ondulations ; influence de la masse en mouvement, de la force élastique et de la vitesse initiale. — Application aux mouvements des liquides dans les tubes élastiques; liquides de différentes densités ; tubes d'élasticités différentes. — Expériences destinées à signaler le passage de l'onde et différents points d'un tube élastique.

Parmi les questions que soulève l'analyse des tracés du pouls recueillis sur des artères plus ou moins éloignées du cœur, dans des conditions d'impulsion cardiaque et de tension artérielle différentes, il en est deux qui sont étroitement liées l'une à l'autre, et dont la solution ne peut être fournie que par l'étude des liquides en mouvement, ce sont : le *retard* du pouls sur la systole cardiaque, et le rebondissement ou *dicrotisme* du pouls.

Pour rendre compte de ce retard, qui s'accentue davantage à mesure qu'on explore une artère plus éloignée du cœur, Weber avait déjà proposé d'appliquer, à ce cas particulier de la circulation artérielle, les données fournies par l'étude des ondes liquides. Après lui, nous avons admis qu'en effet la transmission du mouvement des liquides dans des tubes élastiques mettant un certain temps à s'accomplir, le retard du

pouls doit être proportionnel à l'éloignement du centre d'impulsion (1).

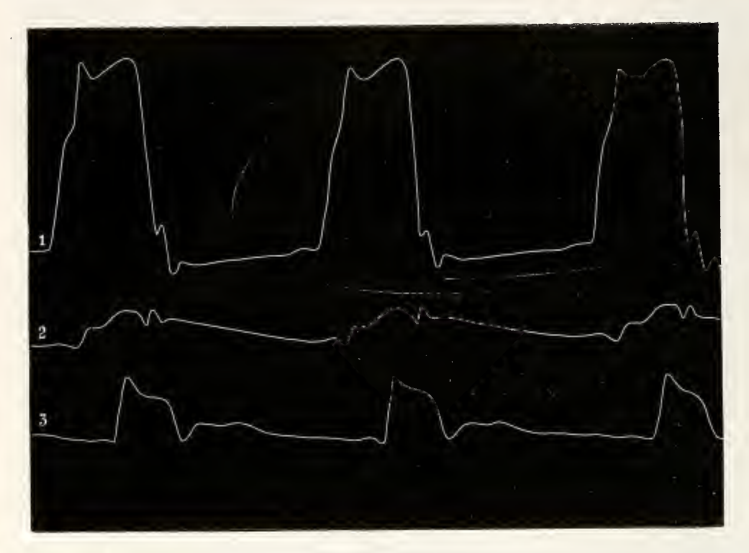


Fig. 52. — Montrant, ligne 1, les débuts de la systole ventriculaire (d'après la pression à l'intérieur du ventricule), et l'instant où se produit le pouls dans l'aorte, ligne 2, et dans la fémorale, ligne 3.

La figure 52 montre les tracés de la pulsation recueillis sur différentes artères d'un cheval ; elle permet de mesurer exactement le retard de chacune de ces pulsations sur la systole ventriculaire.



Fig. 53. — Pouls obtenu sur le schéma avec fréquence croissante des systoles ventriculaires. Différentes formes de dicrotisme.

L'existence d'ondes ou d'oscillations de la colonne de sang contenue dans les différentes artères, en même temps qu'elle explique la transmission lente du pouls, rend compte également de la production du dicrotisme. On peut prouver que ce

(1) *Physiologie médicale de la circulation du sang*, p. 198.

phénomène est purement physique, en le reproduisant dans des conditions tout artificielles.

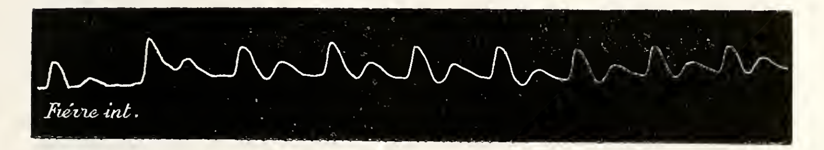


Fig. 54. — Pouls dicrote au commencement du stade de chaleur d'une fièvre intermittente.

Les figures 53 et 54 représentent des tracés du pouls dicrote obtenus, l'un sur l'homme, l'autre sur le schéma de la circulation (1).

Il ne doit donc plus être question de certaines hypothèses émises pour expliquer le dicrotisme du pouls. Celle qui tendait à faire admettre l'existence de deux systoles successives du ventricule ne peut résister à l'auscultation du cœur chez les sujets dont le pouls est dicrote. Chez eux, en effet, on n'entend que les deux bruits normaux et on ne sent que la pulsation unique qui caractérise la révolution régulière du cœur, tandis que le doigt, en explorant le pouls, est frappé par deux pulsations successives. Quant à la théorie qui attribue à une systole artérielle la cause du dicrotisme, elle n'explique rien en réalité, puisque, dans l'hypothèse d'une systole artérielle, il devrait se produire un retrait du vaisseau et une dépression de la courbe tracée, au lieu d'une élévation nouvelle ; il n'y a donc pas lieu de s'attacher à cette théorie et de rechercher quelles actions nerveuses présideraient à ce rhythme régulier, à cette succession étonnante de la systole cardiaque et de la systole artérielle.

Mais, s'il suffit d'admettre l'existence des ondes artérielles pour expliquer l'existence d'un retard du pouls et la production du dicrotisme, cette notion sommaire ne permettrait pas de comprendre toutes les variétés de ce retard, toutes celles qu'on rencontre dans le nombre, l'amplitude et la durée des rebondissements de la pulsation artérielle. C'est dans une connaissance plus approfondie du mouvement des ondes li-

(1) Pour la description de cet appareil, *voy.* le memoire II, p. 66, fig. 45.

ondes liquides, et des influences qui le font varier, qu'il faut chercher de nouveaux perfectionnements de la théorie physiologique.

La théorie des mouvements ondulatoires est un des points les plus délicats, mais aussi un des points les plus importants de la physique, car il constitue l'essence d'un grand nombre de phénomènes de la nature. A toutes les époques de la science, les physiciens et les mathématiciens les plus illustres se sont attachés spécialement à la connaissance de ces mouvements; et même, en se restreignant au cas plus particulier du mouvement des ondes liquides, on trouve des travaux signés des plus grands noms. Les frères E. et W. Weber, dans leur remarquable traité sur ce sujet (1), montrent combien de savants les ont précédés dans ces études, qui, dans les temps modernes, n'ont pas été négligées non plus.

Toutefois, les mouvements qui se produisent dans les conditions spéciales de la circulation artérielle : mouvements d'un liquide enfermé dans des conduits élastiques, ont besoin d'être éclairés par des expériences spéciales où se trouvent réunies toutes les conditions du phénomène physiologique. C'est ce que nous nous proposons de faire dans le présent travail.

Mais avant tout, et pour l'intelligence de ce qui va suivre, qu'on nous permette de rappeler sommairement les lois qui président à tous ces mouvements alternatifs, très-analogues entre eux, qui, sous le nom de vibrations, d'oscillations, ou d'ondulations, s'observent à chaque instant dans la nature.

Partout où une oscillation se produit, c'est qu'il existe une masse, animée de vitesse, soumise alternativement à deux forces de sens contraire.

Prenons, pour fixer les idées, l'exemple d'une verge élastique de métal terminée par une balle de plomb. Si nous frappons sur cette balle, nous lui imprimons une vitesse, et le *travail* que nous avons dépensé pour cela passe tout entier dans la balle de plomb à l'état de *force vive*. Ce travail, emmagasiné, resterait indéfiniment dans cette masse et l'animerait d'une vitesse uniforme, de durée indéfinie, s'il n'était

(1) *Wellenlehre*, Leipzig, 1825.

dépensé par le mobile pour redevenir travail extérieur. Dans le cas choisi pour exemple, la force vive de la masse travaillera contre la force élastique de la verge métallique ; nous verrons celle-ci s'infléchir et la force vive se dépensera peu à peu, ce qui s'accusera par la perte graduelle de la vitesse du mouvement. Quand la balle n'aura plus de vitesse, elle aura perdu toute sa force vive ; alors, tout le travail qu'elle contenait sera passé dans la tige infléchie. Mais, dans cette tige, le travail n'est qu'emmagasiné ; si elle est parfaitement élastique, elle devra le restituer à la balle. Cette masse, en effet, prend un mouvement rétrograde par le redressement de la tige ; et quand celle-ci est redevenue rectiligne, la balle a précisément la même vitesse, contient la même force vive qu'au premier instant. Cette force vive de sens inverse va se dépenser, comme tout à l'heure, à courber la verge dans l'autre sens ; les phénomènes se reproduisent indéfiniment de la même façon, jusqu'à ce que certaines pertes de travail éteignent le mouvement vibratoire.

Toutes les oscillations sont des phénomènes de même nature ; toutes supposent l'existence d'une masse, animée de vitesse, dépensant sa force vive contre une autre force extérieure qui la lui restituera, alternativement dans un sens et dans l'autre, d'une façon plus ou moins complète.

La nature de la force extérieure qui agit sur la masse d'une manière alternative peut changer sans que le phénomène soit modifié d'une manière essentielle. Ainsi, on peut assimiler aux oscillations d'une tige vibrante, celles d'un pendule dans lequel la pesanteur joue le même rôle que l'élasticité dans le précédent exemple.

Lorsqu'un manomètre à mercure est soumis à un rapide changement de pression, des oscillations se produisent, parce que la colonne de mercure est soumise à l'action de la pesanteur qui absorbe sa force vive et la lui restitue tour à tour.

On peut faire osciller une colonne liquide sous l'influence de deux forces élastiques. Si l'on emplit d'eau un tube de verre (fig. 55), terminé par deux tronçons de tube élastique fermés à leurs extrémités, il suffit de frapper sur l'un de ces tubes élastiques pour imprimer au liquide une impulsion qui se traduira par des oscillations successives. La colonne

d'eau s'élance contre l'extrémité du tube, la distend, perd sa vitesse et reçoit de l'élasticité une impulsion qui la ramène en arrière où le même acte se produit ; et ainsi de suite, jusqu'à ce que la résistance que le liquide éprouve dans les conduits vienne éteindre cette vitesse.

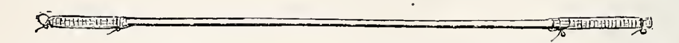


Fig. 55. — Tube de verre terminé à ses deux extrémités par des tronçons de tube de caoutchouc. Le tout rempli d'eau.

Si l'on veut inscrire ces oscillations du liquide, on applique un sphygmographe sur l'un des manchons de caoutchouc comme sur une artère, puis, saisissant entre les doigts l'autre manchon de caoutchouc, on le comprime et on le relâche alternativement. On recueille alors le tracé fig. 56, dans lequel les parties marquées du signe + correspondant aux moments où le tube est comprimé ce qui élève la pression, tandis que les parties marquées du signe — se produisent quand le tube cesse d'être comprimé.

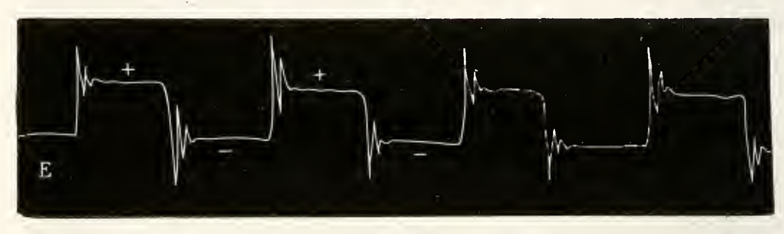


Fig. 56. — Ondes produites par les oscillations d'une colonne d'eau dans un tube, inscrites à l'aide d'un sphygmographe.

Chaque fois que la pression s'élève ou s'abaisse dans le tube, on voit se produire une série de vibrations dans le tracé ; ce sont les oscillations de la colonne liquide qui se porte alternativement d'un coté à l'autre.

Parfois, le corps oscillant est soumis alternativement à deux forces de natures différentes, tel est le cas d'un poids suspendu à un fil élastique. Dans ces conditions, la pesanteur et l'élasticité alternent pour produire des oscillations verticales.

Ainsi, dans toute oscillation, deux forces antagonistes et une masse animée de vitesse sont les deux facteurs nécessaires. Dans la circulation artérielle, nous retrouvons ces deux facteurs : la masse du sang animée de vitesse distend les parois élastiques des vaisseaux ; ceux-ci réagissent à leur tour sur la masse liquide. Les lois générales des mouvements oscillatoires peuvent déjà nous faire prévoir comment certaines influences agiront pour modifier l'oscillation sanguine dans sa durée ou dans son amplitude. Ces lois, en effet, nous apprennent, qu'en changeant un des facteurs de l'oscillation, on en change la durée ou l'amplitude.

1° En augmentant la *masse* du corps oscillant, on accroît la durée de chaque oscillation ;

2° En augmentant la *force élastique* on diminue la durée de l'oscillation ;

3° Enfin, en augmentant la *vitesse* initiale du mobile, on accroît l'amplitude de l'oscillation.

Ces lois peuvent se vérifier dans les conditions déjà indiquées fig. 56, sur les mouvements d'un liquide contenu dans un tube dont les deux extrémités sont élastiques.

Pour vérifier l'influence *des masses*, comparons ce qui se passe quand on emplit le tube avec de l'eau ou avec du mercure. On constate, figure 57, que dans ce dernier cas, la durée des oscillations s'est accrue notablement.

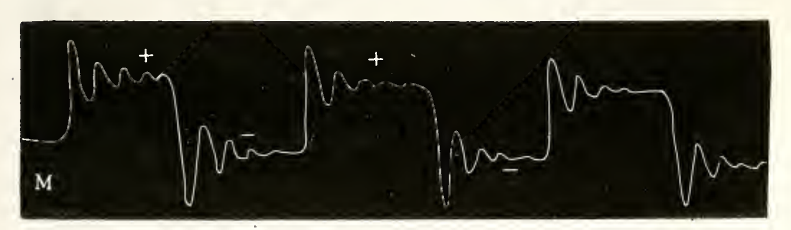


Fig. 57. — Représente la même expérience reproduite avec du mercure substitué à l'eau dans le tube. Les oscillations sont beaucoup plus lentes.

Pour constater l'influence de la *force élastique* toute seule, remplissons le tube avec un même liquide ; mais, dans un cas, plaçons à ses extrémités des tronçons de caoutchouc minces, et, dans l'autre cas, prenons du tube plus épais. De cette façon, nous ferons agir sur la colonne liquide en mouvement des forces élastiques, tantôt faibles, tantôt fortes. La durée

de l'oscillation sera moindre quand on emploiera le tube épais, c'est-à-dire celui dont la force élastique est la plus grande.

Enfin, si l'on imprime à la colonne liquide des *impulsions* plus ou moins rapides, ces impulsions, exigeant des dépenses différentes de travail, produiront des oscillations dont l'étendue croîtra ou décroîtra comme le travail dépensé.

Si incomplètes et rudimentaires qu'elles soient, ces expériences montrent que les oscillations du sang dans les vaisseaux auront des intensités et des durées variables, dans certaines conditions faciles à prévoir. Leur intensité dépendra de la vitesse avec laquelle le cœur chasse le sang dans le système artériel. Quant à la durée des oscillations, on peut prévoir qu'elle sera surtout sous la dépendance des changements de l'élasticité des artères. En effet, l'expérience montre que la densité du liquide employé doit varier considérablement pour changer la durée des périodes du mouvement. La substitution du mercure à l'eau dans les tubes ne fait guère que tripler la durée de l'oscillation ; et pourtant, la différence de densité de ces deux liquides est dans le rapport de 1 à 13. On conçoit que le sang, quelque modifié qu'il soit dans sa constitution, ne saurait changer assez de densité pour qu'il en résulte un changement appréciable dans la durée de ses mouvements oscillants. Mais il n'en est pas de même de l'élasticité des artères qui change avec le degré de tension de ces vaisseaux. L'expérience montre que les artères, très-extensibles tant que leur réplétion est faible, résistent de plus en plus, à mesure qu'on les distend davantage ; leur force élastique croît ainsi d'une manière rapide, surtout à partir du moment où la pression du sang atteint 12 à 15 centimètres de mercure. Ainsi, à partir de ce point, la durée des mouvements oscillatoires diminuera d'une manière progressive, à mesure que s'accroîtra la tension artérielle.

C'est à peu près tout ce qu'on peut prévoir, relativement aux mouvements du sang, d'après les lois générales qui président à tous les mouvements vibratoires. Pour acquérir des notions plus complètes sur la nature de ces mouvements, il faudrait se reporter aux expériences faites dans des conditions plus approchées du phénomène que nous voulons connaître.

Telles seraient, par exemple, celles de Newton, de Flaugergues, de Poisson, de Biot, etc., sur les mouvements des ondes à la surface d'une nappe liquide qu'on agite en un point. Mais l'imperfection des moyens dont ces expérimentateurs disposaient, pour mesurer la vitesse et la longueur des ondes, ne permet pas d'avoir une grande confiance en leurs résultats qui, du reste, se contredisent souvent. Il m'a semblé que la méthode graphique faciliterait singulièrement cette étude.

Déjà en 1858, j'ai entrepris d'inscrire le passage de l'onde en différents points d'un tube élastique remplit de liquide (1). A cet effet, je disposai l'un au-dessus de l'autre trois leviers analogues à ceux du sphygmographe et dont les pointes, placées sur une même verticale, devaient écrire, chacune la pulsation recueillie en un point différent de la longueur du tube. Celui-ci, recourbé plusieurs fois sur lui-même, venait passer sous le premier levier, puis sous le second, enfin sous le troisième. Le liquide était poussé dans le tube par un orifice très-étroit et y pénétrait avec une grande lenteur. On obtenait alors un tracé qui montrait que le début des courbes retarde très-peu d'un bout à l'autre du tube, mais que le sommet de l'onde présente un retard très-considérable. De ces expériences, j'avais cru pouvoir conclure au mode de propagation du mouvement dans les liquides ainsi renfermés dans des tubes élastiques ; aussi, croyant que le sommet des pulsations retarde seul sur l'instant où le liquide pénètre, je pensais que le retard du pouls est plus apparent que réel.

Buisson, dans des expériences analogues, imprima une vitesse plus grande au liquide qu'il poussait dans le tube ; il vit qu'alors les choses se passaient différemment, et qu'on doit considérer le retard du pouls comme réel, c'est-à-dire portant sur le début même des pulsations inscrites. Ces expériences modifièrent mes opinions et me rattachèrent aux idées de Weber sur l'onde sanguine.

Plus tard enfin, les expériences d'Aeby sur l'onde muscu-

(1) Voyez *Annales des Sciences naturelles, Zoologie*, 4e série, t. VIII. — Ces expériences sont décrites et figurées *in* Longet, *Traité de Physiologie*, t. II, p. 185.

laire (1) montrèrent le rôle important que le mouvement ondulatoire paraît exécuter dans les fonctions de la vie. En reprenant ces expériences et en modifiant les appareils destinés à signaler le passage de l'onde à deux ou plusieurs points différents de la longueur du muscle, je me trouvai bientôt en possession d'instruments qui se prêtaient, également bien, à l'étude de l'onde liquide.

La *pince myographique* que j'ai construite pour l'étude de l'onde musculaire sur les animaux supérieurs (2) peut être également appliquée à l'étude de l'onde liquide. Six pinces myographiques disposées sur le trajet d'un tube de caoutchouc plein d'eau, à des distances égales les unes des autres, sont impressionnées successivement par le passage de l'onde et comme chacune de ces pinces communique avec un tambour à levier qui trace sur un cylindre tournant, on obtient six tracés superposés, d'après lesquels on peut estimer la vitesse du transport de l'onde et les changements de formes qu'elle éprouve dans son trajet.

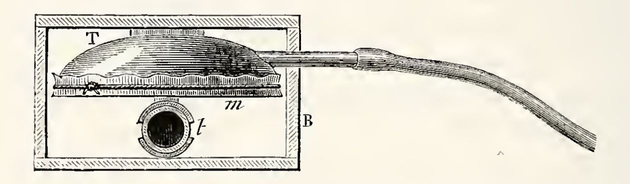


Fig. 58. — Montrant la disposition d'un des explorateurs de l'onde.

Mais comme il est assez coûteux de se procurer un aussi grand nombre de pinces myographiques, on peut substituer à ces instruments un petit explorateur de l'onde très-facile à construire.

Un tambour métallique T (fig. 58), semblable à celui qui fait partie de la pince myographique, est collé à l'intérieur d'une petite caisse de bois B, de façon que la membrane du tambour soit tournée en bas. La caisse est ouverte sur deux de ses côtés pour laisser passer, au-dessous du tambour, le tube *t* qu'on

(1) *Untersuchungen uber die Vortpflanzungsgeschwindigkeit der Reizung in der quergestreiften Muskelfaser*, Braunschweig, 1862.

(2) Voy. *la Machine animale*, p. 36, Paris, 1873.

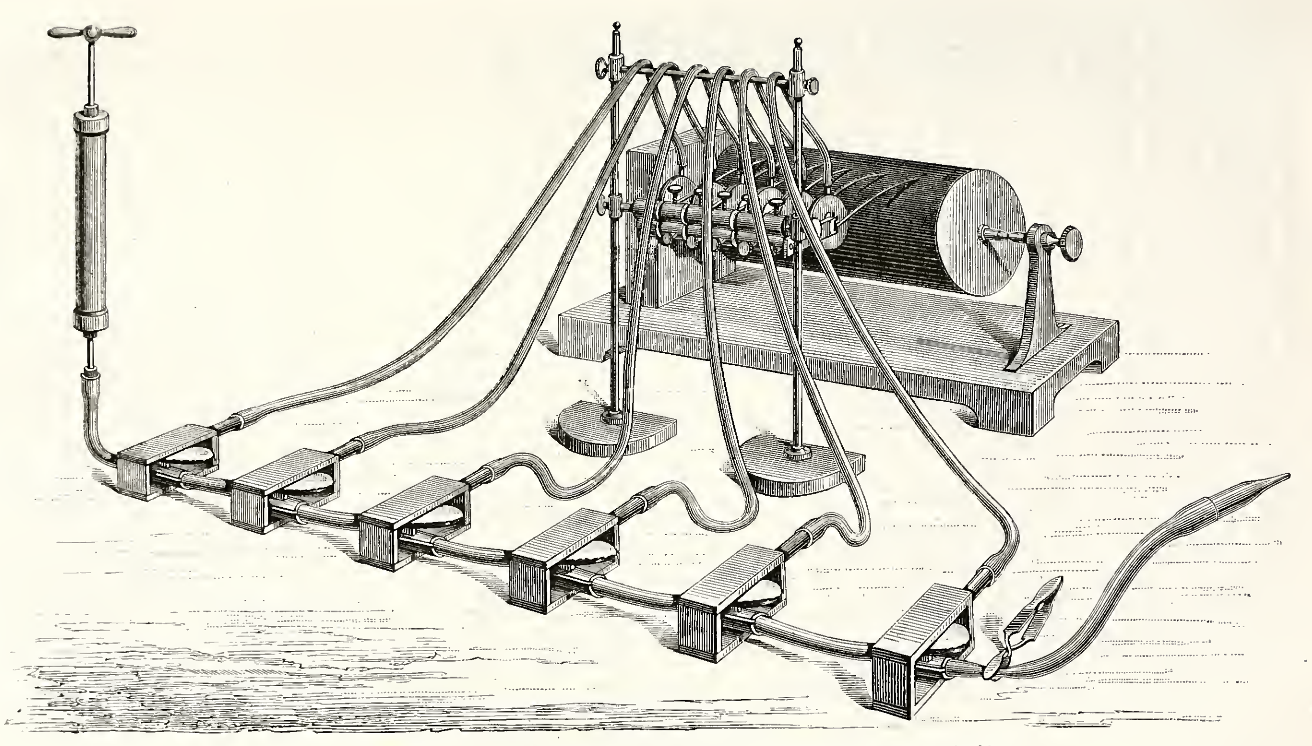


Fig. 59. — Disposition de l'expérience pour inscrire les mouvements des ondes liquides.

explore; celui-ci repose sur une demi-gouttière de métal collée sur la face inférieure de la caisse. Une autre demi-gouttière repose sur le tube et est mise en contact avec la membrane du tambour. Lorsque le passage de l'onde dilate le tube de caoutchouc, les deux demi-gouttières de métal tendent à s'écarter l'une de l'autre, et comme la supérieure est seule mobile, c'est elle qui exécute la totalité du mouvement ; elle comprime le tambour placé au-dessus d'elle et envoie au levier inscripteur le signal du passage de l'onde.

La figure 59 représente la disposition de l'appareil complet. Un tube horizontal de caoutchouc est rempli de liquide ; à l'une de ses extrémités est une pompe, à l'autre un ajutage d'écoulement que l'on peut laisser ouvert ou fermé suivant la nature de l'expérience. Le tube traverse une série de six petits explorateurs semblables à celui qui vient d'être décrit plus haut ; ces explorateurs sont situés à une distance de 20 centimètres les uns des autres ; le tube se prolonge au delà du dernier, mais on peut, au moyen d'une pince, le fermer immédiatement après son passage sous le 6e explorateur. De cette façon, l'onde viendra heurter, en ce point, contre l'obstacle formé par la pince. Les six tambours à levier, dont chacun est actionné par un des explorateurs de l'onde, tracent sur un même cylindre qui tourne avec une vitesse de 28 centimètres par seconde. Cette vitesse est contrôlée par un chronographe de 50 vibrations doubles par seconde.

Expériences sur le mouvement des ondes.

A) Premier cas. — Onde positive dans un tube fermé a son extrémité.

L'appareil étant disposé comme dans la figure 59, et le tube fermé au 6e explorateur, on enfonce brusquement le piston de la pompe ; l'eau s'élance dans le tube, les six leviers entrent en mouvement et le tracé est inscrit sur le cylindre.

L'œil suffit, quand l'onde n'est pas trop rapide, pour faire

constater que le déplacement des leviers est successif. Leurs pointes se meuvent les unes après les autres, comme si un souffle passait sur elles ; on voit même qu'après une déviation dans le sens de l'impulsion du liquide, elles en reçoivent une autre en sens inverse. Mais l'analyse du tracé permet seule de bien comprendre le phénomène qui s'est produit.

Analyse de la figure 60 (au verso). — L'onde obtenue dans cette expérience est une onde *positive*, c'est-à-dire formée par la pénétration du liquide dans le tube ; elle s'accompagne donc d'une élévation de la pression sur tout son parcours. C'est à cette pression élevée qu'est dû le gonflement du tube qui met en jeu chaque explorateur et se traduit, dans le tracé, par une élévation de la courbe. Nous aurons à considérer successivement les phénomènes suivants que présente l'onde liquide :

1° La vitesse de propagation de l'onde ; 2° la réflexion et l'onde de retour ; 3° les changements de hauteur de l'onde aux divers points de son parcours ; 4° les changements successifs de la forme de l'onde ; 5° la formation d'ondes secondaires pour une impulsion unique.

1° *Vitesse de propagation de l'onde.* — Dans la figure 60, les tracés doivent se compter de bas en haut ; le tracé I est fourni par le 1er explorateur de l'onde, tout près de l'orifice d'entrée du liquide ; et le tracé VI appartient au dernier explorateur.

Le temps qui s'écoule entre les apparitions successives de l'onde sous les divers explorateurs s'estime en cinquantièmes de seconde et en fractions de ces divisions, au moyen du tracé chronographique. A cet effet, on abaisse une perpendiculaire du sommet de chacune de ces courbes, et on la prolonge jusque sur le tracé du chronographe. Si les intervalles qui séparent deux perpendiculaires successives sont égaux, c'est-à-dire s'ils contiennent le même nombre de vibrations, on doit considérer la vitesse de l'onde comme uniforme. Alors, en effet, la distance qui sépare deux explorateurs successifs est constante : 20 centimètres, et le temps employé à la parcourir es le même.

Dans la figure 60 on voit que, pour parcourir 20 centimètres

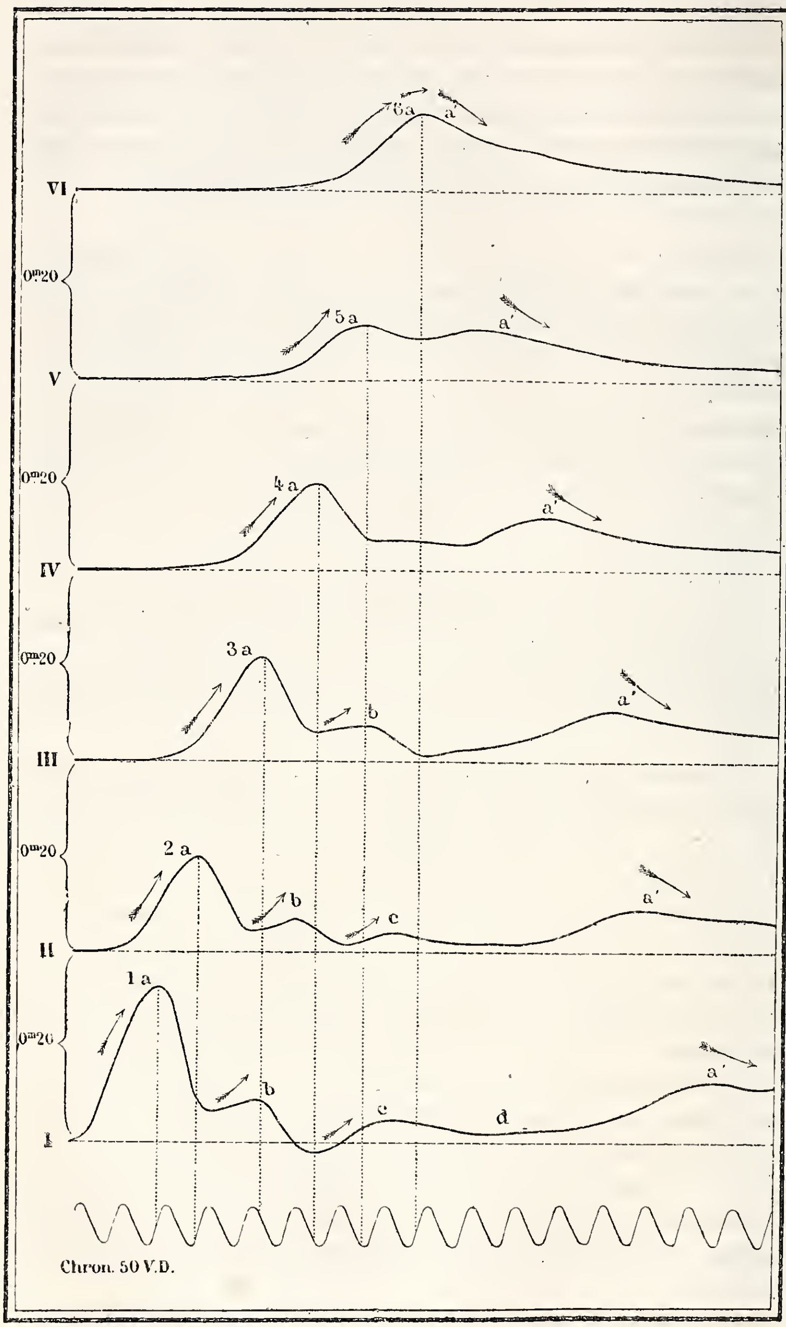


Fig. 60. — Mouvements d'une onde positive dans un tube élastique fermé.

dans le tube, l'onde mettait 1/50 de seconde environ, ce qui porte sa vitesse à 10 mètres environ par seconde (1).

Explication de la figure 60.

La ligne des abscisses représente les temps; chaque durée peut être évaluée en 50e de seconde et en fractions, d'après le nombre de vibrations doubles du chronographe.

La ligne des ordonnées exprime les longueurs de tube ou les espaces parcourus par l'onde. Entre deux explorateurs il y a un intervalle de 0m,20. Les distances verticales I à II; II à III, etc., correspondent donc à 0m,20 de chemin parcouru par l'onde.

Les lettres *a*, *b*, *c*, *a'*, dans les 6 tracés superposés, marquent chacune le sommet d'une même onde, et permettent d'en suivre la marche. Une flèche indique le sens dans lequel se fait la propagation. Ainsi 1 *a*, 2 *a*, 3 *a*... 6 *a*, signalent la marche de la première *onde directe positive* qui, partant de l'orifice d'entrée où elle est signalée par l'explorateur n° 1, arrive à l'extrémité fermée du tube où elle se réfléchit. On peut alors suivre cette même onde pendant son retour; elle est signalée par les lettres *a'* 6, *a'* 5.... *a'* 1. Le lieu de la réflexion est indiqué par le changement de direction des flèches qui d'ascendantes qu'elles étaient, deviennent descendantes.

Les ondes *secondaires* sont signalées par des lettres qui permettent également de les reconnaître ; ainsi *b* désigne la 2e onde, *c* la troisième. *d* la quatrième. Ces ondes secondaires s'éteignent plus ou moins vite; l'onde *b* ne dépasse pas le 3e explorateur, c'est-à-dire qu'elle s'éteint après un parcours de 0m,40; l'onde *c* ne parcourt que de 0m,20 ; l'onde *d* ne parcourt pas 0m,20.

La *vitesse* d'une onde quelconque se déduit du temps qui s'écoule entre l'instant de son apparition sous le 1er explorateur et le moment où elle apparaît sous le second. Comme le début d'une onde se distingue moins facilement que le sommet, c'est de ce dernier point qu'on a mesuré les positions successives de l'onde. A cet effet, on abaisse une perpendiculaire du sommet de chaque onde 1 *a*, 2 *a*, etc., sur l'axe des abscisses et le tracé du chronographe.

La vitesse des ondes peut encore se mesurer d'après l'inclinaison d'une ligne qui joindrait entre elles les bases de chacune des perpendiculaires abaissées du sommet de la courbe sur l'abscisse de celle-ci. Dans le cas où cette vitesse serait uniforme, on aurait ainsi une ligne droite, ce qui n'a pas lieu dans la figure 60.

La *longueur* d'une onde se déduit de l'espace qui sépare les origines ou les sommets de deux ondes successives à un même instant. Comme

(1) Il ne faut pas oublier que cette vitesse correspond à un certain diamètre et à une certaine élasticité du tube, et que si les conditions changent, la vitesse change également.

Mais cette vitesse n'est pas absolument uniforme ; dans le cas présent, elle est à son maximum à l'orifice d'entrée, et d'autre part s'accélère un peu au voisinage de l'extrémité fermée du tube.

Un autre moyen d'estimer l'uniformité ou la non-uniformité de la vitesse de l'onde consiste à abaisser une ligne verticale du sommet de chacune des courbes sur l'abscisse correspondante et à réunir entre eux les pieds de toutes ces perpendiculaires. Si la vitesse est uniforme, la ligne doit être une droite oblique dont l'inclinaison, selon qu'elle est plus ou moins voisine de la verticale, indique une vitesse plus ou moins grande. Dans le cas présent, cette ligne présenterait une double inflexion qui exprime un double changement de vitesse.

2° *Réflexion de l'onde à l'extrémité fermée du tube. — Onde de retour.* — Arrivée à l'extrémité du tube, l'onde suit une marche rétrograde et repasse successivement sous chacun des explorateurs jusqu'à l'orifice d'entrée du liquide. Dans ce parcours inverse, indiqué figure 60 par des flèches descendantes, l'onde a sensiblement la même vitesse que dans son trajet direct. On peut s'en convaincre en tirant une ligne dans les conditions ci-dessus indiquées. Cette ligne aurait sensiblement la même inclinaison que celle qui exprime la vitesse de l'onde directe ; mais elle serait inclinée en sens inverse, ce qui correspond à un mouvement du liquide en sens contraire.

Pour s'assurer de la réalité de ce mouvement rétrograde, il y a divers procédés. L'un donne la certitude absolue, c'est celui qui consiste à traduire au dehors le mouvement du liquide à l'intérieur du tube. Chauveau, voulant résoudre ce problème sur l'artère d'un animal, planta une aiguille à tra-

les sommets des courbes sont plus faciles à saisir, nous choisirons les premiers. Il s'agit donc de mesurer la longueur de tube qui sépare le sommet de l'onde *a* de celui de l'onde *b* qui marche derrière elle. Dans le tracé n° III, le sommet 3 *a* de la première onde se trouve verticalement au-dessus du sommet *b*, du tracé n° I. Ces deux sommets sont donc signalés au même instant par des explorateurs distants l'un de l'autre de $0^m,40$; l'onde a donc $0^m,40$ de longueur. On constaterait de même que du sommet 5 *a*, au sommet 3 *b*, la même longueur existe aussi.

vers les parois du vaisseau. La partie de cette aiguille qui plongeait dans le courant sanguin subissait un entraînement dans le sens du mouvement, de sorte que celle qui se trouvait au dehors se déviait en sens inverse du mouvement du liquide.

Plongée de cette façon dans le tube sur lequel nous étudions le mouvement de l'onde, l'aiguille accuse, par ses déviations alternatives de sens contraire, qu'il se produit dans le liquide des déplacements alternatifs de sens opposés.

L'autre procédé, pour démontrer la réflexion de l'onde, consiste à faire varier le point où elle se réfléchit. Dans l'expérience qui a fourni la figure 60, on a vu que la pince qui ferme le tube se trouvait placée immédiatement après le 6e explorateur ; cet explorateur se trouve donc au lieu même de la réflexion de l'onde. Il se produira, en cet endroit, une onde plus haute que dans les autres points, attendu que toute la vitesse du liquide se transformera en pression latérale qui dilatera le tube. Dès que cette pression sera arrivée à son maximum, par l'extinction de la vitesse du liquide, il se fera un mouvement rétrograde. En somme, l'onde sera simple au 6e explorateur, puisqu'il n'y aura qu'une élévation suivie d'une diminution de la pression. Enlevons l'obstacle formé par la pince et transportons le 12 centimètres plus loin ; l'onde, dans son trajet direct, passera sous le 6e explorateur comme elle a déjà fait sous les autres, puis elle ira se réfléchir contre le nouvel obstacle et reviendra en arrière pour repasser de nouveau sous le sixième explorateur. Cet instrument aura donc signalé deux ondes distinctes au lieu d'une seule ; la deuxième est l'*onde réfléchie*.

La figure 64 (ligne pleine) montre cette bifurcation du sommet de la dernière courbe, qui se produit quand on place l'obstacle au delà du dernier explorateur.

L'intervalle qui sépare le sommet de l'onde directe de celui de l'onde réfléchie permettrait même de déterminer la position de l'obstacle, si cette position était inconnue. Cet intervalle de temps correspond, en effet, à la durée du va-et-vient de l'onde, c'est-à-dire au temps nécessaire pour que celle-ci parcoure deux fois la longueur de tube qui sépare le dernier explorateur du point de réflexion. Comme la vitesse de

l'onde est déjà assez exactement connue par les mesures indiquées dans le précédent paragraphe, il est facile d'estimer la longueur à laquelle s'étend le du tube au delà d'un explorateur qui signalerait à la fois l'onde directe et l'onde réfléchie.

Dans tous les cas où l'explorateur, appliqué sur un tube, signalerait deux ondes, il est possible de savoir si l'on a affaire à deux ondes successives directes ou s'il s'agit d'une onde directe et d'une onde réfléchie. Une première solution peut être obtenue par l'implantation d'une aiguille dans le tube, selon la méthode de Chauveau. L'autre solution peut être obtenue en comprimant le tube au-dessous (en aval) de l'explorateur. Si les deux ondes sont directes, la compression les exagère toutes deux ; si l'une est directe et l'autre réfléchie, la compression exagère l'onde directe et supprime l'onde réfléchie.

3° *Changements de hauteur de l'onde aux différents points de son parcours.* — On vient déjà de voir comment et pourquoi l'onde prend une plus grande amplitude au moment où elle arrive à l'extrémité fermée du tube, à l'endroit où elle se réfléchit. Un phénomène analogue se produit à l'orifice d'entrée ; c'est là que la hauteur de l'onde atteint son maximum. Ainsi, dans un tube fermé, l'onde à ses *maxima* d'intensité aux deux extrémités ; ses *minima* à la partie moyenne. (La figure 60 ne montre pas très-clairement ces différences d'amplitude de l'onde ; cela tient à ce que les derniers explorateurs n'étaient pas suffisamment sensibles).

Quant à la cause de ces inégalités d'amplitude, au commencement et à la fin du tube, elle est la même dans l'un et l'autre cas : c'est, de part et d'autre, un effet de l'*inertie* du liquide.

Si, à son point d'arrivée, l'onde s'exagère, c'est, avons-nous dit, parce que sa vitesse s'éteint ; en d'autres termes, cela tient à ce que la force vive se transforme en travail de dilatation du tube.

A l'orifice initial, l'inertie se traduit par un effet inverse. Le liquide qui pénètre ne peut imprimer instantanément un mouvement de translation à toute la colonne contenue dans le tube ; celle-ci résiste par son inertie, de sorte que la pénétration du liquide se fait par dilatation des parois. C'est à cette

dilatation que tient la grande amplitude de l'onde qu'on observe à la partie initiale du tube où elle atteint son maximum.

Si l'on étudiait les phases de la vitesse du liquide aux différents points de la longueur du tube, on verrait qu'elle présente des variations inverses de celles de la pression. Ce sera l'objet d'études ultérieures.

4° *Changements successifs de la forme de l'onde.* — Si l'on compare entre elles les courbes successives que donne la série des appareils, on constate que l'onde change de forme d'un bout à l'autre du tube. Ce changement consiste essentiellement en une diminution de l'amplitude et en une augmentation de la durée de l'onde ; à mesure qu'on l'observe plus loin du point où elle prend naissance, le sommet de la courbe devient plus arrondi en même temps que sa hauteur diminue.

Cela tient à l'élasticité qui tend à uniformiser la pression dans les différents points de la colonne liquide. C'est cet effet bien connu qui, dans la circulation du sang, supprime la pulsation dans les artères éloignées du cœur. La diminution graduelle de l'onde est masquée, dans les tracés supérieurs de la figure 60, par l'augmentation qui tient à la réflexion contre l'obstacle ; mais si l'on suit l'onde réfléchie dans son cours rétrograde, on voit qu'elle continue à se transformer, perdant toujours de l'amplitude et gagnant de la durée.

Il arrive parfois que l'onde réfléchie, arrivée à la région initiale du tube, s'y réfléchit de nouveau et repart dans le sens de son premier mouvement ; mais l'onde est alors peu visible, sa transformation est presque complète, ce qui se traduit par une extrême réduction de son amplitude et un très-grand accroissement de sa durée.

5° *Formation d'ondes secondaires pour une impulsion unique du liquide.* — On voit encore dans la figure 60, sur chacune des courbes superposées, que la première, *onde directe*, est suivie d'une série plus ou moins nombreuse de petites ondes décroissantes. Celles-ci sont directes également ; on peut les suivre plus ou moins loin dans la série des courbes, et la ligne qui exprimerait leur vitesse est sensiblement parallèle à celle qui exprimerait celle des premières ondes.

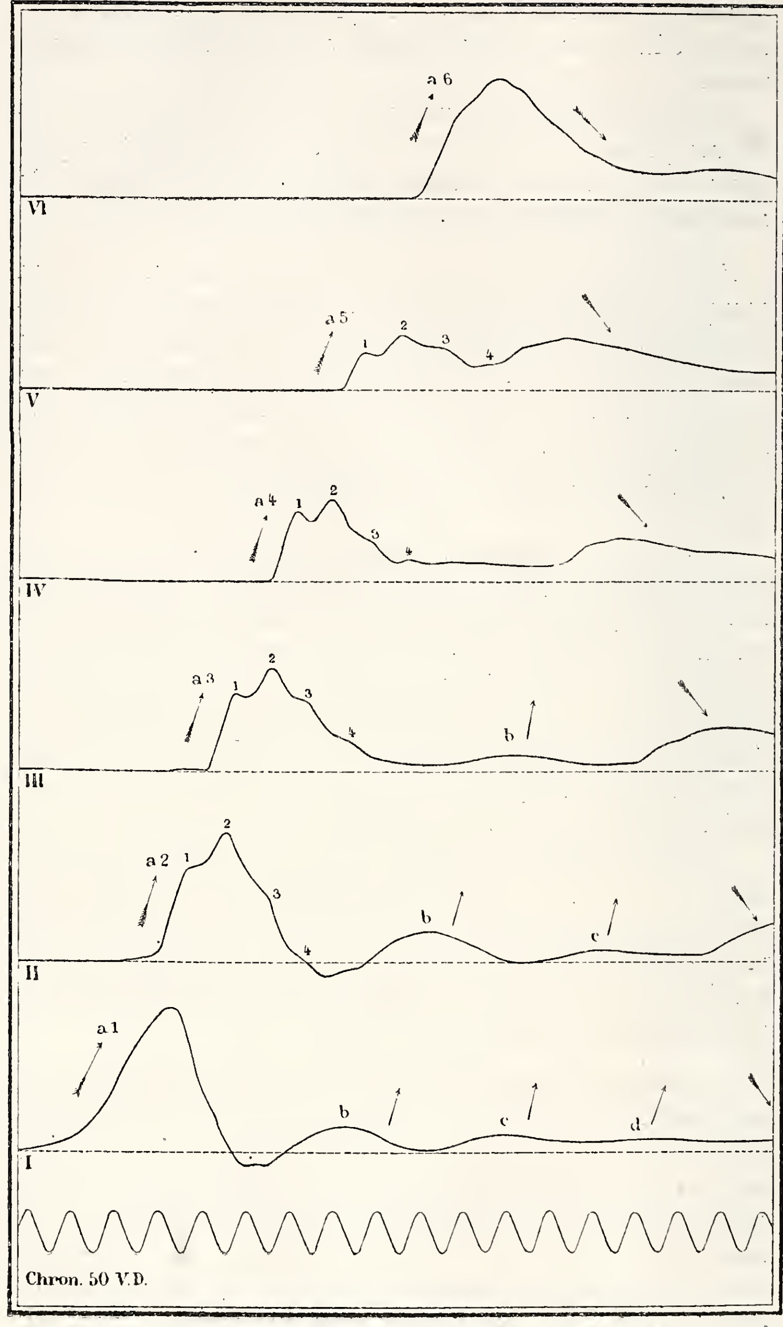


Fig. 61. — Ondes de second ordre ou harmoniques, dans un tube fermé.

Ainsi, de petites ondes successives se propagent dans le même sens que la première et se poursuivent, en quelque sorte, sans pouvoir s'atteindre, puisqu'elles ont la même vitesse.

Il est facile de se rendre compte du mode de formation des ondes *directes secondaires*. Elles sont liées à la vitesse avec laquelle le liquide est poussé dans le tube élastique, et ne prennent naissance que dans le cas où la colonne liquide est poussée avec assez de brusquerie pour que sa *vitesse acquise* lui fasse abandonner les régions initiales du tube. La colonne liquide laisse donc derrière elle un vide relatif ; derrière elle, la pression est plus ou moins diminuée ; aussi, dès que le liquide aura suffisamment dépensé sa force vive, verra-t-on se produire un reflux plus ou moins considérable et, à la suite de ce reflux, une réflexion qui amènera une deuxième onde directe. Celle-ci, à son tour, si elle a assez de vitesse, pourra, quoiqu'à un degré moindre, produire les mêmes phénomènes et donner naissance à une troisième onde directe. On conçoit que ces ondes successives, devenant de plus en plus faibles, ne puissent être très-nombreuses, ou du moins ne soient pas longtemps visibles dans le tracé.

L'onde réfléchie, de son côté, se comporte comme l'onde directe. Elle peut aussi donner naissance à des ondes secondaires dont le mécanisme ne diffère pas de celui qui vient d'être exposé. Toutefois, ces ondes secondaires réfléchies sont moins nettes et moins nombreuses que les ondes secondaires directes, à cause de l'extinction que l'élasticité du tube produit dans les ondes, surtout quand la longueur du tube est considérable.

Enfin, quand on se sert de tubes épais, et quand l'impulsion donnée au liquide est brusque, on voit apparaître des ondes d'un autre ordre qui se superposent à celles que nous venons de décrire. Ces *ondes de second ordre* sont plus nombreuses que les ondes de premier ordre ; elles constituent pour ainsi dire l'*harmonique* de la vibration principale. Si l'onde principale était comparée au son fondamental que rend une corde vibrante, les ondes de second ordre en seraient la 2e octave aiguë. (*Voy.* fig. 61.)

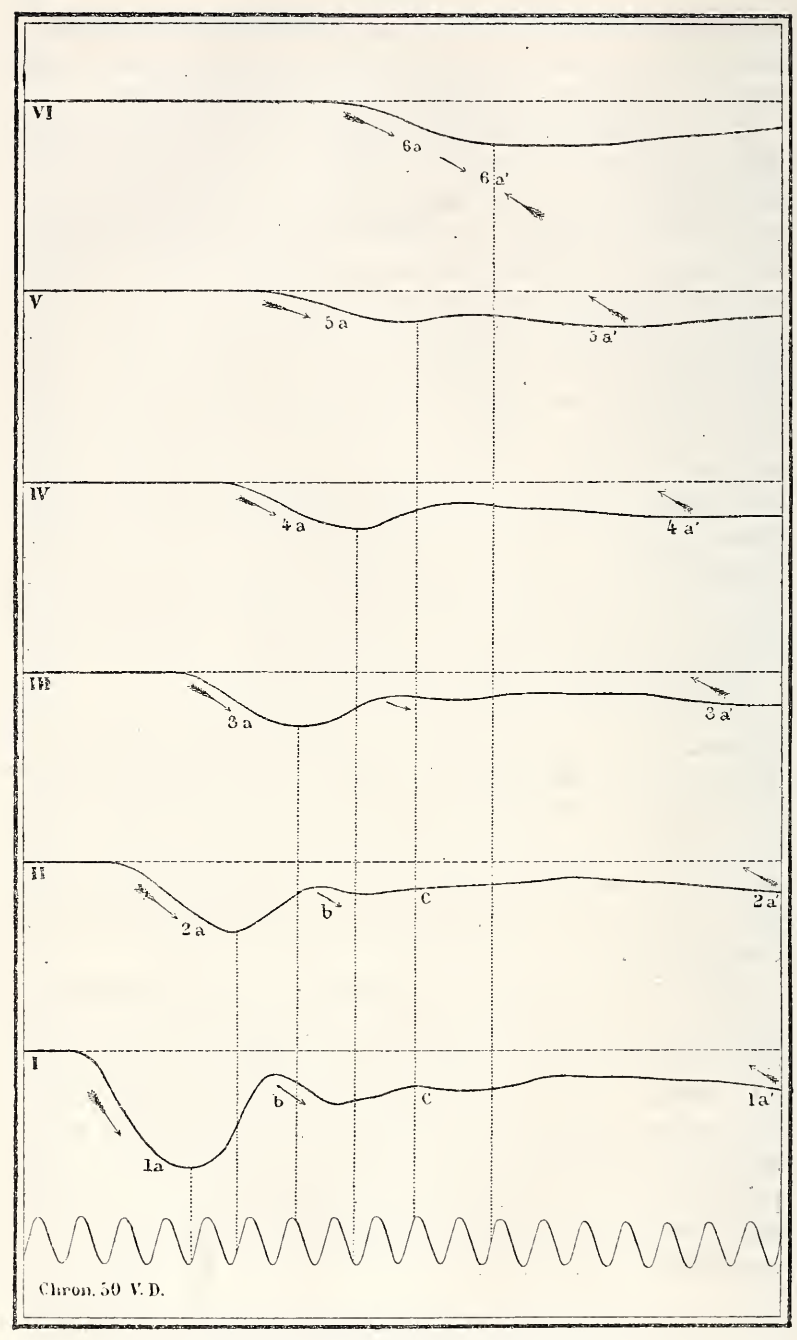


Fig 62. — Onde negative dans un tube fermé.

B) Deuxième cas. — Onde négative dans un tube fermé.

Reportons-nous toujours à la figure 59 pour la disposition des appareils, mais supposons, qu'au lieu de fouler le liquide dans le tube, nous l'aspirions, au contraire, en retirant le piston de la pompe. L'effet produit sera une diminution de diamètre du tube, et cet effet se transmettra de proche en proche. Ces ondes seront *négatives*, puisqu'elles consisteront en abaissements du niveau de la courbe. Les lois de la transmission de la vitesse et celles de la transformation des ondes sont les mêmes que celles qui président au mouvement de l'onde positive. On en jugera par l'analyse de la figure 62 (1).

1° *Vitesse de l'onde négative.* — Si l'on observe la pente que présenterait la ligne qui exprimerait les vitesses de toutes ces ondes négatives successives, on voit que cette ligne serait sensiblement parallèle à celle qui dans la figure 60 marquerait la vitesse des ondes positives; il y a donc même vitesse de propagation pour ces deux sortes de mouvements.

L'aspiration produite à l'origine du tube crée un vide dans lequel se précipitent les tranches successives de la colonne liquide, et ce mouvement se propage jusqu'à l'extrémité du tube qui est oblitérée.

2° *Réflexion de l'onde négative.* — Quand le liquide a reflué de proche en proche, et que la dernière tranche s'est mise en marche, il se produit pour elle un effet particulier qu'on peut assimiler à la réflexion de l'onde positive ; car il en est exactement l'inverse ou la réciproque. Cette dernière tranche, en effet, se porte du côté des régions initiales du tube, mais elle n'est plus suivie comme les autres par des tranches nouvelles situées derrière elle. Son reflux crée donc un vide d'autant plus grand que rien ne vient le combler ; aussi, la

(1) Dans la figure 62, les lettres et les chiffres ont la même valeur que dans la figure 60 ; les flèches indiquent de même le sens du mouvement de l'onde. Comme le tube employé était plus mince, il y a un peu moins de vitesse que dans la figure 60.

pression tombe-t-elle très-bas dans cette région. Mais cet abaissement même de la pression provoque un reflux qui lui succède bientôt et met fin à l'onde négative, dans la région du tube qui est le siége de l'oblitération. Le reflux, à son tour, fait naître une nouvelle onde négative qui se transmettra de proche en proche jusqu'aux régions initiales du tube.

3° *Changements d'amplitude de l'onde négative aux différents points de son parcours.* — Au point de vue de l'amplitude de l'onde, il se produit des variations identiques à celles que nous avons signalées pour l'onde positive : c'est-à-dire que les maximas se trouvent à l'origine et à la fin du tube.

4° *Changements successifs de la forme de l'onde négative.* — Ces transformations sont encore de même ordre que celles de l'onde positive. Il y a diminution de l'amplitude et augmentation de la durée des ondes ; c'est encore un effet de l'élasticité du tube qui éteint les inégalités de pression et de vitesse dans les liquides qui se meuvent à son intérieur.

5° *Formation d'ondes négatives multiples, pour une seule aspiration à l'origine du tube.* — Ces ondes sont moins nombreuses, d'une manière générale, que celles qui accompagnent les ondes positives. En effet, les ondes négatives ne recevant leur mouvement que du retrait élastique du tube se font avec moins de vitesse que les positives, pour la production desquelles peut agir une force très-grande. C'est la raison qui rend les ondes négatives plus petites et qui les fait s'éteindre beaucoup plus tôt. Du reste, il n'y a rien de particulier à dire sur ces ondes *négatives secondaires* et sur leur mode de production. Quand un reflux de liquide s'est produit à l'origine du tube, la colonne, animée d'une vitesse rétrograde, vient bientôt se heurter contre l'orifice d'entrée qui n'est plus perméable. La force vive qui s'éteint alors se transforme en pression latérale, d'où formation d'une *onde secondaire*, positive puis négative, qui voyage à la suite de la première.

C) Troisième cas. — Ondes dans un tube ouvert.

Dans les tubes ouverts, il faut distinguer les cas où le tube gardant son calibre d'un bout à l'autre présente les mêmes

résistances au mouvement de l'onde sur tout son parcours, et ceux où le tube se termine par des voies plus ou moins étroites.

Si le tube est largement ouvert, on observe les phénomènes suivants :

1° Il ne se produit pas d'onde réfléchie ;

2° L'intensité de l'onde va diminuant sans cesse jusqu'à l'extrémité du tube.

3° La vitesse de l'onde diminue peu à peu.

Ce fait confirme l'opinion ci-dessus énoncée : que dans le cas de tube fermé, figure 60, l'accélération apparente du mouvement de l'onde au voisinage de l'extrémité close tient à l'accroissement d'amptitude que produit la réflexion.

Si le tube s'ouvre par un ajutage plus ou moins étroit, on se rapproche des conditions du tube fermé, et l'on voit apparaître l'onde réfléchie, qui prend d'autant plus d'importance que l'étroitesse de l'orifice d'écoulement est plus grande.

Ces lois s'appliquent aux ondes positives comme aux ondes négatives.

Représentation stéréoscopique de mouvements de l'onde dans un tube élastique. — Pour rendre plus intelligible la signification des courbes ci-dessus enregistrées, il faudrait représenter la série d'apparences que prend le tube à des instants successifs.

Il est clair, puisque le tube est parcouru par une série d'ondes qui se poursuivent, qu'on doit, s'il a une longueur suffisante, le voir à chaque instant présenter la forme d'une espèce de chapelet, ou celle d'une série de fuseaux placés bout à bout. Ces fuseaux auraient des renflements de moins en moins considérables : celui qui marche en tête étant le plus volumineux. Quant à la longueur de ces fuseaux, elle serait la même pour tous, puisque les ondes se suivent à des intervalles constants et se meuvent avec la même vitesse.

Pour avoir une idée de cette disposition, il faudrait, ainsi que l'a proposé Buisson (1), construire une figure en relief établie sur une planchette rectangulaire et dans laquelle le relief des ondes correspondrait à l'amplitude des tracés ; l'un des côtés

(1) Buisson. *Thèse inaugurale*, p. 18, Paris, 1862.

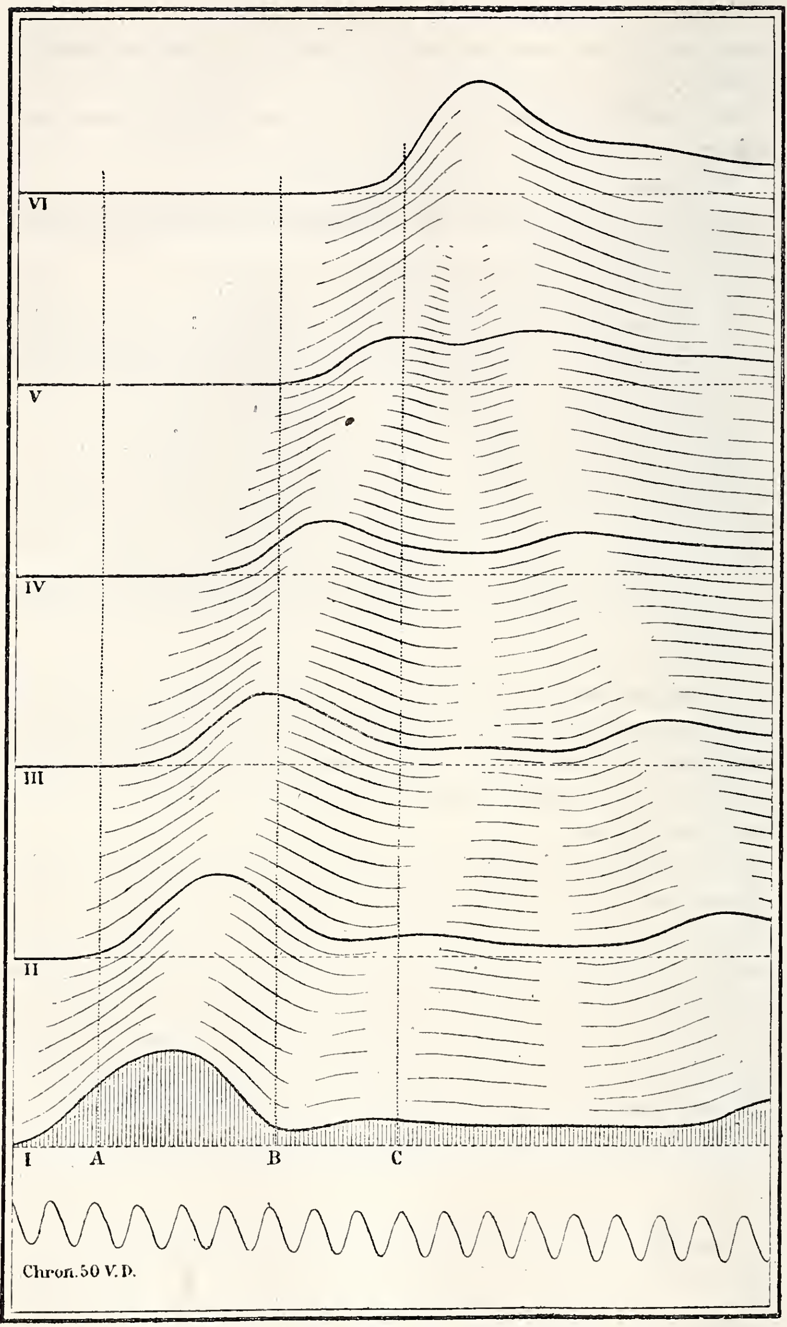


Fig. 63. — Représentation stéréoscopique du trajet de l'onde.

du rectangle servirait à compter les durées (ce serait l'axe des abscisses), tandis que l'autre exprimerait les longueurs de tube parcourues par l'onde (ce serait l'axe des ordonnées). Pour donner sur le papier une idée de cette construction, il faut, à l'aide de hachures, ombrer l'intervalle des courbes, et donner à cette série de tracés un relief pareil à celui d'une figure solide. La figure 63 rend compte de cette apparence. On y reconnaît la série des ondes positives, primitives et secondaires ; on y voit aussi le relief de l'onde réfléchie.

Mais, dans cette figure, l'œil embrasse à la fois des mouvements qui se produisent à des instants successifs. Il faut donc, pour apprécier la forme que présente le tube à un instant quelconque, ne voir à la fois que ce qui correspond à une même division du temps : restreindre, par exemple, le champ de la figure à ce qui serait visible par une fente verticale, ou à ce qui serait recouvert par une ligne verticale. Pour signaler la forme du tube aux instants suivants, la fente ou la ligne se transporterait de gauche à droite.

Ainsi, pour savoir ce qui se passe dans le tube à une série d'instants successifs, il suffira de promener de gauche à droite une règle tenue perpendiculairement à l'axe des abscisses de toutes les courbes. On voit alors que pendant les premiers instants A, au moment où a lieu l'impulsion de la pompe, le tube est cylindrique dans toute son étendue, sauf à l'origine, où il commence à se renfler par l'arrivée du liquide. Un peu plus tard B, le renflement s'étend plus loin et diminue déjà aux régions initiales. Plus tard encore C, deux renflements existent sur le tube : la première onde est suivie d'une onde secondaire déjà formée. On suivra de même ce qui se passe au moment de la réflexion.

Notons enfin que si l'on considère, à ce point de vue, le mouvement des ondes dans le tube, on arrive aisément à la notion de *longueur de l'onde*. Cette longueur, en effet, n'est autre que la distance verticale qui sépare les origines et les sommets de deux ondes consécutives.

Pour estimer la valeur réelle de cette distance, il faut se souvenir que, sur l'axe des *ordonnées*, l'intervalle qui sépare deux courbes successives correspond à celui qui sépare deux explorateurs du tube. Or, cet intervalle est de 20 centimètres;

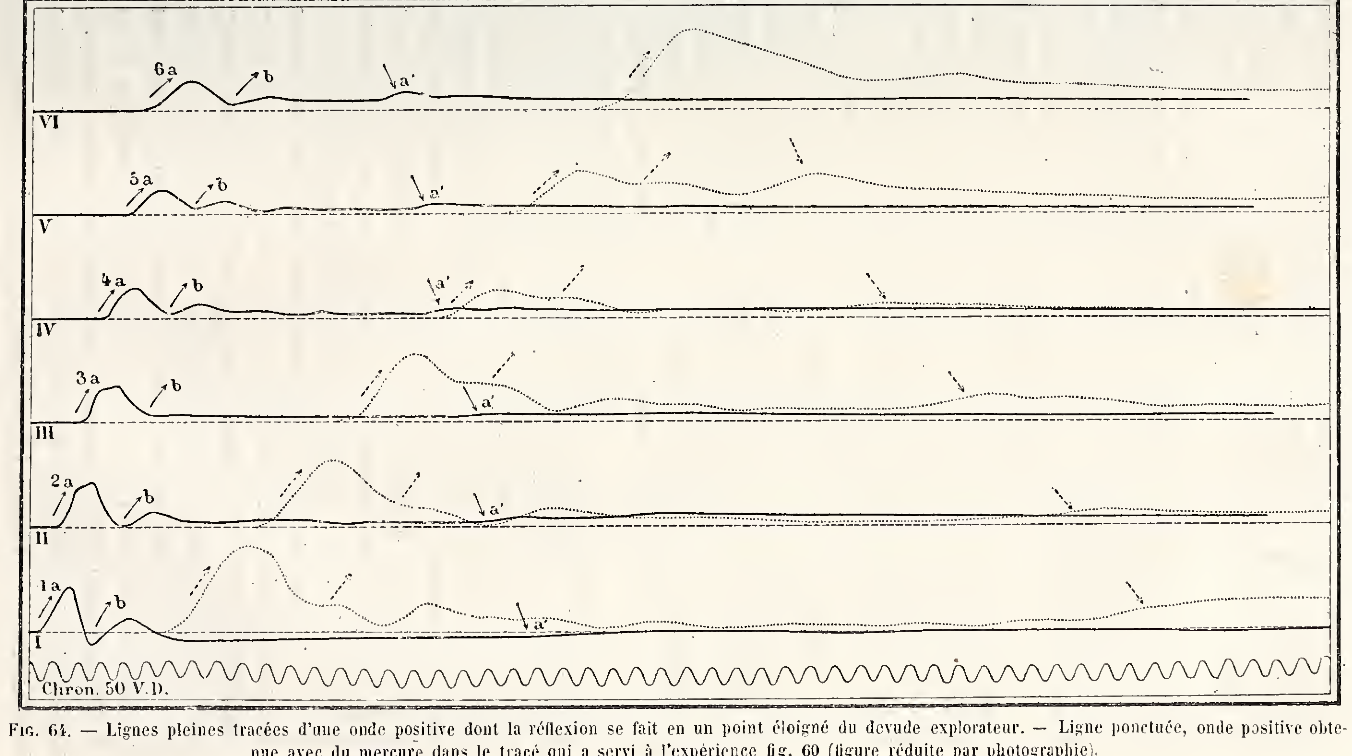


Fig. 64. — Lignes pleines tracées d'une onde positive dont la réflexion se fait en un point éloigné du devude explorateur. — Ligne ponctuée, onde positive obtenue avec du mercure dans le tracé qui a servi à l'expérience fig. 60 (figure réduite par photographie).

il permettra d'obtenir la valeur réelle des longueurs d'ondes. On devra donc conclure que, dans le cas présent, la longueur de l'onde est de 60 centimètres environ.

Des influences qui font varier la vitesse du transport de l'onde. — Si l'assimilation que nous avons faite de l'onde liquide avec les autres phénomènes vibratoires est juste, on devra constater des changements dans la vitesse de cette onde toutes les fois qu'on fera varier l'un des deux facteurs du mouvement vibratoire : *la masse en mouvement et la force élastique du tube.*

Pour changer la masse en mouvement, substituons du mercure à l'eau qui était employée tout à l'heure, nous obtiendrons un ralentissement considérable du transport de l'onde. Voir les tracés formés par des lignes ponctuées, figure 64.

Du reste, on voit, par cette figure, qu'il n'y a rien de changé que la vitesse du transport de l'onde ; la nature du mouvement est la même.

On en peut dire autant de ce qui arrive lorsqu'on change *la force élastique* du tube. Augmentons la force élastique, en substituant à un tube mince un autre tube à parois plus épaisses ; nous obtiendrons une accélération du transport de l'onde. Enfin, si nous lançons dans un tube élastique une série d'ondes successives, nous pouvons constater, qu'à mesure que la tension du tube s'accroît, la vitesse du transport de l'onde s'accélère.

Weber avait déjà prévu que la vitesse de transmission de l'onde sanguine dans les artères doit varier avec l'état de la pression du sang. Quand cette pression augmente, les artères plus tendues deviennent moins extensibles et la vitesse de l'onde s'accroît.

Avant l'emploi d'appareils inscripteurs pour signaler le passage de l'onde en deux points différents du système artériel, il eût été bien difficile de vérifier l'exactitude de l'hypothèse de Weber ; aujourd'hui, une pareille mesure ne présente plus de difficultés. Mais on s'aperçoit, en faisant de telles mesures, que la question est plus complexe que Weber ne l'avait supposé et que la plus ou moins grande élasticité des artères n'est pas la seule condition qui règle la vitesse de l'onde.

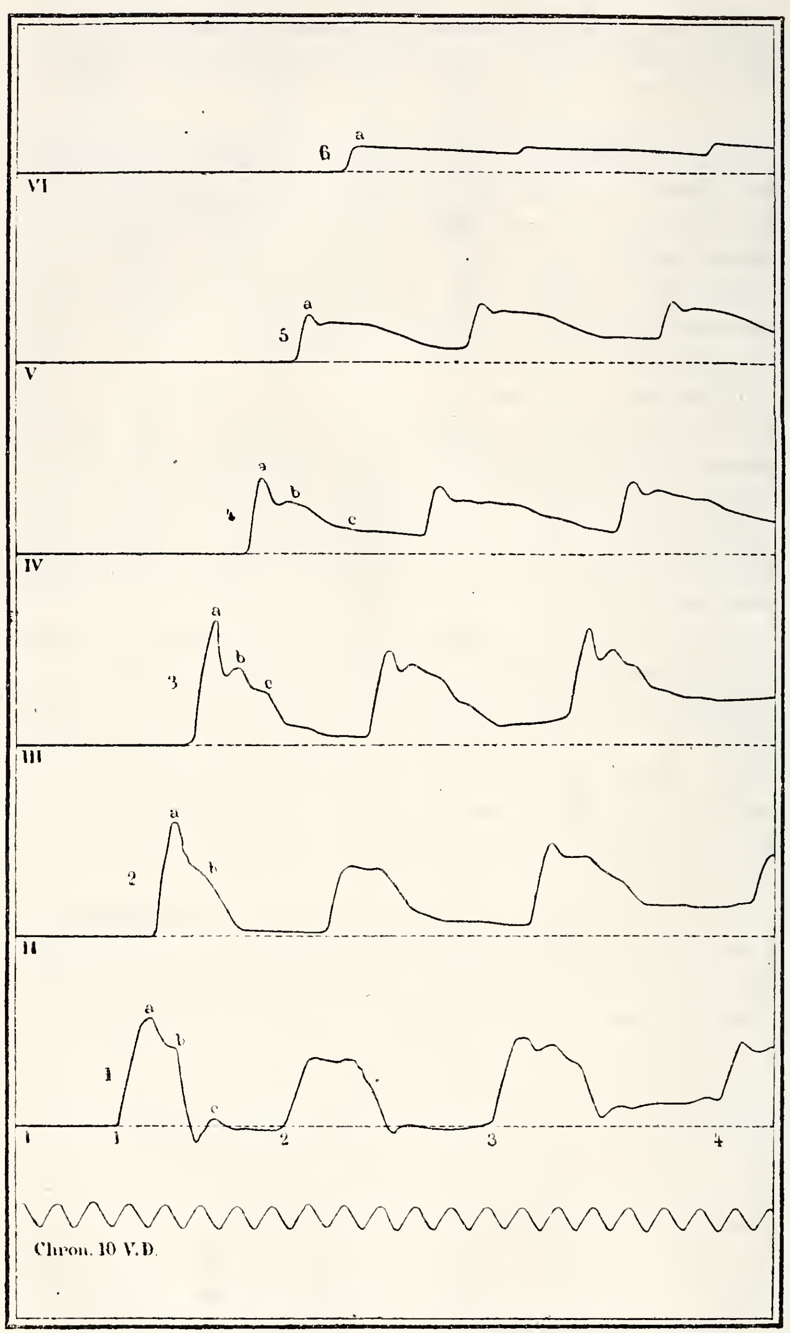


Fig. 65. — Afflux abondants de liquide dans le tube. (Rotation lente du cylindre.)

INFLUENCE DE LA VITESSE D'IMPULSION DU LIQUIDE SUR LA FORMATION DES ONDES.

On a dû remarquer, dans les expériences précédentes, que le nombre et l'intensité des ondes secondaires varie notablement d'une expérience à l'autre. Cela tient à la différence des vitesses avec lesquelles le liquide pénètre dans les tubes. Ainsi, la fig. 60 présente, au voisinage de l'orifice d'entrée du liquide, trois ondes secondaires ; la fig. 63 n'en offre qu'une très-faible et qui s'éteint bientôt. C'est que dans le premier cas, le liquide était poussé dans le tube avec vitesse ; on en peut juger par la brusquerie de l'ascension des tracés. La lenteur de l'impulsion du liquide s'accuse au contraire dans la fig. 63 où les courbes s'élèvent d'une façon moins brusque.

Cette influence de la vitesse du liquide sur le nombre des ondes s'explique facilement d'après la théorie précédemment exposée. Il faut que le liquide possède une grande vitesse pour qu'en s'élançant dans le tube, il laisse derrière lui un vide qui, provoquant un reflux, fera naître une deuxième onde, celle-ci une troisième et ainsi de suite.

Un fait non moins remarquable, c'est l'influence de la vitesse avec laquelle se fait la pénétration du liquide sur la vitesse du transport de l'onde. Les mêmes figures montrent que l'onde chemine plus vite quand elle est due à une brusque pénétration du liquide.

INFLUENCE DU VOLUME DES AFFLUX DU LIQUIDE SUR LES CARACTÈRES DES ONDES.

A égale rapidité d'impulsion, si l'on envoie dans un tube une faible quantité de liquide, les tracés obtenus accusent la formation d'ondes secondaires, comme on l'a vu dans les chapitres précédents. En outre, ces ondes secondaires apparaissent dès l'origine du tube ; c'est même en ce point qu'elles ont leur maximum d'intensité. Mais si l'afflux du liquide est abondant, si, par conséquent, il présente une certaine durée,

les choses se passent autrement. L'onde proprement dite, c'est-à-dire l'*ébranlement* du liquide se combine à un *courant* qui la pousse, de sorte que, derrière l'onde, il ne se forme pas ce vide nécessaire à la formation des ondes secondaires. C'est du moins ce qui s'observe dans les tracés recueillis à l'origine du tube.

La fig. 65 montre une série de courbes obtenues avec des afflux quatre à cinq fois plus considérables que dans les expériences précédentes. Ces afflux, assez analogues aux systoles d'un ventricule du cœur, se traduisent, dans les courbes de la ligne I, par des formes qui rappellent assez bien celles de la pression intra-ventriculaire, fig. 50: une ascension suivie d'un sommet aplati.

Toutefois, on observe un vestige d'ondes secondaires sur la courbe n° I, mais ces ondes se prononcent bien davantage sur les courbes recueillies plus loin de l'orifice d'entrée du tube : la courbe n° III les montre avec leur maximum. Ainsi, le volume de l'ondée sanguine que le sang lance dans le système artériel influe sur la forme des courbes et sur la production des ondes secondaires.

Trois impulsions successives de liquide se voient dans la série des six courbes, fig. 65. L'impulsion n° 2, ligne I, n'a presque pas d'ondes secondaires ; tandis que, ligne III, elle en présente de très-nettes.

Dans l'expérience qui nous occupe, à mesure que le tube reçoit des afflux successifs de liquide, la pression s'élève à son intérieur, car le tube perd moins par le fait de l'écoulement qu'il ne reçoit de la pompe. Cet accroissement de la pression donne naissance à des phénomènes importants à constater : d'une part à l'accroissement de la vitesse de transport des ondes, d'autre part à la diminution de leur amplitude. Nous connaissons déjà le premier de ces phénomènes ; le second nous occupera plus tard d'une manière spéciale.

DES ONDES LIQUIDES DANS LES TUBES BRANCHÉS.

Si nous imaginons que des tubes élastiques de même diamètre soient branchés les uns sur les autres et communi-

quent tous entre eux, une impulsion de liquide, à l'intérieur de ce système, produira des ondes extrêmement compliquées. Chaque branche, indépendamment des ondes qui se forment en elle, en recevra des branches voisines, et il en résultera une complication inextricable.

Il semble, au premier abord, que dans la circulation du sang, cette confusion doive se produire ; qu'à travers l'aorte, les artères des bras et de la tête échangent leurs ondes entre elles et avec les artères des membres inférieurs. Il n'en est rien. L'aorte, grâce à sa capacité considérable et à sa grande élasticité, constitue une sorte de réservoir où les ondes sont à peine sensibles. C'est dans chaque artère en particulier que naissent les ondes qu'on observe dans le tracé de sa pulsation (1).

Pour en donner la preuve, voici l'expérience qu'on peut faire: On prend un tube élastique et de gros calibre, imitant, par ses dimensions, une aorte humaine et sur ce tube on en branche d'autres plus petits qui représenteront des artères. Si l'on observe la pulsation et ses ondes sur deux de ces artères, dont l'une soit très-courte et l'autre très-longue, on voit que pour une même impulsion de liquide à l'intérieur de l aorte, les deux artères se comportent différemment ; que chacune a ses ondes propres dont la durée et l'intensité dépendent de la longueur et de l'élasticité du tube où elle se forme; enfin que les ondes formées dans un tube ne se transmettent pas dans l'autre.

La figure 66 représente les tracés fournis en même temps par deux tubes branchés, à la façon de deux artères, sur un

(1) Dans mes premières études sur la circulation, je croyais que le pouls dicrote tenait à la réflexion d'une onde qui revenait de l'extrémité de l'aorte et des iliaques aux régions voisines du cœur. J'abandonnai bientôt cette théorie. Buisson interpréta à son tour le pouls dicrote d'une façon différente, mais dans sa théorie, intervenaient également des ondes qui, à travers l'aorte, auraient passé d'une artère dans une autre. Certaines expériences semblaient justifier l'opinion de cet ingénieux physiologiste ; ainsi, en comprimant les artères fémorales, il supprimait une des ondes dans le tracé de la carotide. La compression des fémorales produit, dans la circulation aortique, un effet qu'il ne faut pas négliger : elle y élève considérablement la pression du sang ; elle crée à l'arrivée de l'ondée ventriculaire une résistance soudaine qui éteint la brusquerie de son afflux. C'est à ces influences qu'il faut attribuer les changements que présente alors le pouls de la carotide; j'espère en donner plus loin la démonstration.

même conduit large et élastique rappelant la disposition de l'aorte.

Ces tubes-artères ont tous deux la même élasticité et le même diamètre, mais ils sont de longueurs inégales. Le

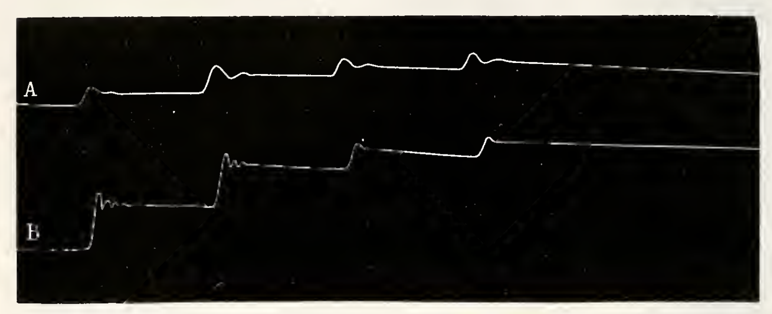


Fig. 66. — A et B, pulsations recueillies dans deux tubes branchés sur un même réservoir comme les artères sur l'aorte. — A, tube long. — B, tube court.

plus long, A, donne des ondes dont la durée est considérable; le plus court, B, des ondes très-brèves. Aucune transmission ne se fait d'un tube à l'autre, ainsi qu'on le voit clairement dans la figure, car aucune onde lente n'apparaît dans le petit tube, ni aucune onde brève dans le grand.

Des expériences précédentes résultent plusieurs notions applicables à la théorie des mouvements du sang dans les artères; je les ai réunies sous forme de conclusion.

CONCLUSIONS.

1° Lorsqu'un liquide pénètre avec vitesse et d'une manière intermittente dans un conduit élastique déjà plein, il se forme, dans la colonne liquide tout entière, des *ondes positives* qui se transportent avec une vitesse indépendante du mouvement de translation du liquide. Ces ondes semblent soumises aux lois générales des mouvements ondulatoires; des appareils spéciaux permettent de les étudier.

2° *La vitesse* de transport d'une onde est proportionnelle à la force élastique du tube; elle varie en raison inverse de la

densité du liquide employé; elle diminue graduellement pendant le parcours de l'onde; elle croit avec la rapidité d'impulsion du liquide.

3° *L'amplitude* de l'onde est proportionnelle à la quantité de liquide qui pénètre dans le tube, et à la brusquerie de sa pénétration ; elle diminue peu à peu pendant le parcours de l'onde.

4° Quand un afflux de liquide dans le tube est bref et énergique, il peut se faire, sous l'influence de cette impulsion unique, une série d'ondes successives qui marchent les unes à la suite des autres. *Ces ondes secondaires*, formées suivant les lois du mouvement vibratoire, ont des amplitudes graduellement décroissantes ; en outre, elles peuvent être suivies plus ou moins loin sur le trajet du tube : les dernières formées, étant les plus faibles, s'éteignent les premières.

5° Quand une onde est suivie d'ondes secondaires, on peut mesurer la *longueur* de chacune d'elles, d'après l'intervalle qui sépare deux sommets consécutifs. La longueur d'une onde augmente quand diminuent sa vitesse et son amplitude.

6° Si, au lieu d'introduire du liquide dans le tube, on en retire au contraire une petite quantité, il se forme une *onde négative* qui est soumise aux mêmes lois que l'onde positive, et peut être suivie d'ondes négatives secondaires.

7° Lorsque le tube dans lequel se forment les ondes est fermé, ou suffisamment rétréci à son extrémité, il se forme des *ondes réfléchies* qui suivent un trajet rétrograde et reviennent à l'origine du tube. Ces ondes réfléchies se distinguent des ondes directes en ce que la compression du tube en aval du point exploré augmente l'intensité des ondes directes et supprime les ondes réfléchies. Au lieu où se fait la réflexion, l'amplitude des ondes augmente, ainsi qu'on l'observe à la surface d'un bassin, quand les ondes viennent en frapper les parois.

8° Si le liquide pénètre avec une grande rapidité dans un tube à parois peu extensibles, on voit se former ce qu'on pourrait appeler des *vibrations harmoniques* ; elles sont surajoutées aux ondes principales ; leur nombre est un multiple de celui des ondes. Ces harmoniques n'apparaissent pas à l'orifice d'entrée du tube, mais seulement un peu plus loin et disparaissent près de l'extrémité opposée.

9° Quand le liquide pénètre dans le tube, en grande quantité et pendant assez longtemps, son afflux prolongé s'oppose à l'oscillation rétrograde qui fait naître les ondes secondaires. Toutefois, celles-ci peuvent apparaître à une certaine distance de l'orifice d'entrée du tube.

10° Dans les tubes branchés, de calibres et d'épaisseurs semblables, il se fait un mélange très-compliqué d'ondes qui passent d'un tube dans l'autre. Mais, dans les conditions de la circulation du sang, l'aorte ne permet pas le passage des ondes d'une artère dans une autre. L'aorte a ses propres ondes qu'elle envoie dans toutes les artères où elles se transforment plus ou moins, mais elle éteint et absorbe, comme un réservoir élastique, les ondes que chaque artère lui apporte et ne les envoie point aux autres.

11° Quand de petits tubes de longueurs inégales sont branchés sur un tube plus gros, comme les artères le sont sur l'aorte, chacun de ces tubes est le siége d'ondes qui lui sont propres, qui se forment à son intérieur et dont la longueur varie avec celle du tube.

IV

LA MÉTHODE GRAPHIQUE DANS LES SCIENCES EXPÉRIMENTALES.

Segnius irritant animos demissa per aurem,
Quam quæ sunt oculis subjecta fidelibus et quæ
Ipse tibi tradit spectator.

(HORACE.)

INTRODUCTION.

Il n'est plus nécessaire aujourd'hui de faire ressortir les avantages de la méthode graphique dans les sciences expérimentales. Le développement rapide que l'emploi de cette méthode a pris, depuis quelques années, montre que tout le monde a compris quels services elle peut rendre partout où elle est applicable; aussi, la voit-on s'introduire peu à peu dans toutes les branches de la science. L'exposition de certains résultats numériques n'exige plus de longues pages de chiffres : la construction de quelques courbes sur le papier dégage d'une statistique ou d'une observation tous les résultats qu'elle contient. Mais l'importance de la méthode graphique est plus grande encore lorsque, au moyen d'appareils inscripteurs, elle nous livre directement la courbe du phéno-

mène étudié. Le nombre des appareils inscripteurs était autrefois très-restreint, et l'application de la méthode graphique était par conséquent fort bornée; mais aujourd'hui, chacun se préoccupe de construire de nouveaux instruments et d'inscrire des phénomènes dont l'observation demandait beaucoup de temps et beaucoup de peine, sans donner des résultats d'une précision satisfaisante. Pour ma part, j'ai cherché constamment à étendre le domaine de cette méthode, et si j'ai parfois découvert des faits de quelque importance, c'est à son emploi que je le dois.

Le but de ce travail est de montrer combien on peut développer l'emploi de la méthode graphique appliquée aux sciences expérimentales, et de faire voir que bien des phénomènes sur lesquels autrefois elle ne semblait pas avoir prise, sont aujourd'hui de son ressort.

Une tendance naturelle des méthodes expérimentales, à leurs débuts, est de multiplier considérablement le nombre des appareils dont elles se servent : pour chaque phénomène particulier que l'on voulait inscrire, on construisait un instrument spécial; mais cette richesse apparente était un obstacle au développement de la méthode. Réduire à son minimum le nombre des appareils nécessaires à l'expérimentateur me paraît être un des plus grands services qu'on puisse rendre à la science. Mais, pour atteindre ce but, il faudrait établir une sorte de classification des phénomènes de la nature, constituer certains groupes ne renfermant que des actes similaires susceptibles d'être étudiées au moyen des mêmes appareils. Chacun de ces groupes comprendrait des phénomènes de natures très-différentes, de sorte qu'un même instrument pourrait être employé par l'astronome, le physicien, le physiologiste, le mécanicien, le chimiste, etc. Je ne me dissimule pas la difficulté que présente une classification de ce genre, la rigueur et la méthode qu'il faudrait y apporter, mais, au risque de ne donner qu'une ébauche fort incomplète, je crois l'entreprise si utile que je veux la tenter.

L'ordre que l'on doit suivre dans cette classification de-

vant conduire, par un enchaînement naturel, des phénomènes les plus simples aux plus compliqués, nous examinerons d'abord les applications de la méthode graphique aux phénomènes mécaniques.

Lorsqu'on observe le mouvement d'un corps, on n'arrive pas, du premier coup, à la connaissance parfaite du phénomène qui s'accomplit. Ce qui frappe d'abord, c'est le *déplacement* proprement dit, avec son *étendue :* le corps occupait un point de l'espace, il en occupe un autre. Ces *relations d'espace* peuvent être plus ou moins complexes; ainsi, la détermination d'une série de positions que le corps a occupées nous donne la trajectoire parcourue ; celle-ci peut, à son tour, être rectiligne ou curviligne, inscrite ou non dans un plan, etc.

A ces premières connaissances viennent s'en ajouter de nouvelles, lorsqu'intervient la notion de *rapports du temps à l'espace ;* de cette relation se déduisent : les durées, les vitesses, l'uniformité ou les variations du mouvement qu'on observe.

Ce n'est pas tout encore; le mouvement d'un objet matériel exige, pour se produire, une quantité de force dont la mesure est *le travail mécanique* dépensé. Mais, pour produire un même mouvement, il faudra dépenser des quantités de force différentes suivant la masse du corps déplacé, suivant sa vitesse et suivant le milieu dans lequel il se meut. On appelle *résistance* la consommation de force à chaque élément de l'espace parcouru ; *le travail* sera donc le produit de la résistance multipliée par l'espace. Enfin, pour savoir si ce travail s'est dépensé d'une façon uniforme ou variée, il faudra déterminer *la triple relation* de l'espace, du temps et de la force.

On voit déjà que les difficultés s'accroissent à mesure qu'on veut mieux connaître la nature d'un phénomène mécanique, et nous n'avons encore parlé que des obstacles qui tiennent à la complexité des notions dont le concours est nécessaire. Que sera-ce quand chacune des mesures d'espace, de temps

ou de force, présentera elle-même de grandes difficultés ? C'est alors qu'interviendront ces artifices admirables qui mettent à la portée de nos sens ce qui leur échappait, qui grandissent les dimensions trop petites pour notre vue, qui prolongent les durées trop courtes, qui mesurent les forces que nous ne saurions estimer.

Le but des appareils inscripteurs est de nous fournir automatiquement une mesure fidèle de l'espace, du temps et même de la force mécanique, avec les relations réciproques de ces trois facteurs *du travail.*

Pour bien faire comprendre le but et le mécanisme des appareils inscripteurs, nous choisirons des exemples dans lesquels les figures tracées sur le papier, pour exprimer un mouvement, fournissent des notions de plus en plus complexes.

PREMIÈRE PARTIE.

PHÉNOMÈNES MÉCANIQUES.

I. — Tracé des relations d'espace.

Trajectoire des corps. — Machine inscrivant ses mouvements. — Verges de Wheatston, expériences de Kœnig et de Lissajoux. — Pantographe — Transmission des mouvements à distance.

Lorsqu'un point lumineux se déplace avec vitesse, il laisse de son passage une trace brillante; tantôt, c'est une traînée lumineuse comme celle qui persiste quelque temps dans le ciel après le passage d'un bolide; tantôt c'est notre œil lui-même qui garde quelques instants la sensation de l'éclat qui l'a frappé. Cette lueur, réelle ou subjective, nous montre, dans son ensemble, le chemin parcouru par un charbon ardent qu'on agite; elle nous révèle la marche en zig-zag de l'éclair, c'est elle, sans doute, qui a inspiré à l'homme l'idée d'exprimer par une figure plane la trajectoire apparente des corps qui se déplacent. Cette expression du mouvement est identique à celle de la forme matérielle des corps; au reste, ces deux notions, de mouvement et de forme, sont connexes dans l'esprit. La ligne droite n'est-elle pas définie le *chemin* le plus court d'un point à un autre? La géométrie n'enseigne-t-elle pas que la circonférence du cercle est engendrée par le *mouvement* d'un point qui reste toujours à la même distance d'un autre point immobile qui est le centre? Enfin, l'artiste qui re-

produit la figure d'un objet ne *suit-il* pas avec les yeux tous les contours que son crayon retrace sur le papier.

Ainsi, un même procédé suffit pour exprimer, avec une facilité égale, une forme ou un mouvement ; mais il n'est pas également facile d'acquérir ces deux notions. Pour apprécier la forme, nous pouvons user du concours de tous nos sens facilité par la permanence et la fixité de cette forme.

Pour apprécier un mouvement, au contraire, notre vue seule peut nous servir, dans la plupart des cas, et bien souvent encore le mouvement, par sa nature, lui échappe tout à fait ; il est trop lent ou trop rapide, ou n'a pas une étendue suffisante.

Les appareils inscripteurs surmontent toutes ces difficultés à la fois, lorsqu'ils chargent le mobile lui-même de tracer la forme de son mouvement. Ce résultat n'a guère été obtenu jusqu'ici que dans certains cas spécialement favorables, mais cette méthode d'inscription autographique prend chaque jour une extension plus grande et l'on ne saurait prévoir où s'arrêtera son emploi.

Imaginons une machine dont les organes se meuvent avec une grande vitesse ; l'œil ne peut mesurer l'étendue, ni même apprécier la forme de ces mouvements. Mais, qu'on attache un crayon à l'une de ces pièces mobiles et qu'on reçoive, sur un papier, le tracé du mouvement produit, on obtiendra des figures variables suivant le mode de déplacement de l'organe exploré : une ligne droite exprimera un mouvement rectiligne et en mesurera l'étendue; ailleurs, se traceront des figures circulaires ou elliptiques d'une régularité plus ou moins grande. On s'apercevra alors que le mouvement des pièces n'est pas toujours celui que la théorie de la machine eût fait prévoir ; que l'élasticité d'un organe ou l'imperfection d'un ajustage suffisent pour altérer le mouvement et pour troubler les fonctions du mécanisme (1).

(1) On raconte que Le Chatelier voulant corriger, à l'aide de contre-poids, les mouvements de lacet qu'imprime aux locomotives la vitesse acquise des pistons et des bielles, suspendit avec des chaînes une de ces machines et la fit mettre en marche de façon que les roues tournaient librement dans l'air. Puis, plaçant au-dessous de la locomotive un pinceau qui frottait sur une feuille de papier, il recueillit une courbe, d'apparence elliptique, d'assez grande étendue. Des contre-poids de différentes masses furent alors employés jusqu'à ce que, par

Mais le mouvement qu'on veut connaître n'est pas toujours susceptible d'être inscrit sur le papier avec ses dimensions réelles ; s'il est trop petit, il faut le grandir pour que sa trace devienne visible ; trop grand, il doit être réduit pour tenir dans les dimensions du papier (1). Les procédés d'amplification ou de réduction sont nombreux ; ils dérivent, pour la plupart, des propriétés géométriques du levier, comme cela se voit dans le pantographe. L'amplification ou la réduction d'un mouvement peut se faire également au moyen d'engrenages.

L'un des plus grands obstacles à l'emploi de la méthode graphique pour étudier les déplacements d'un corps, c'est la difficulté qu'il y a, presque toujours, à fixer à ce corps un style écrivant, et surtout à placer une feuille de papier de façon qu'elle reçoive le tracé du style. Aussi, est-il indispensable d'avoir un moyen de transmettre le mouvement à distance, l'empruntant à l'organe qu'on étudie pour l'envoyer au style qui doit l'inscrire sur le papier. C'est par des tubes à air que j'ai obtenu les transmissions les plus satisfaisantes.

La disposition qui se prête à la plupart des expériences consiste à employer deux *tambours à levier* (2) dont l'un reçoit le mouvement tandis que l'autre le trace.

tâtonnements graduels, on eut amené le pinceau à ne plus tracer qu'une figure d'étendue extrêmement réduite ; les oscillations de la machine étaient alors sensiblement supprimées.

(1) Certains actes fournissent naturellement leur expression graphique. Les roues d'un char, les pieds des chevaux, laissent sur le terrain la trace de leur passage. Plusieurs naturalistes ont utilisé ces empreintes pour étudier les différents modes de locomotion. Ainsi, les insectes ou les oiseaux, quand on les place sur une surface convenablement sensibilisée, laissent des traces fort nettes des positions successives que leurs pattes ont occupées. Les animaux rampants tracent la route qu'ils ont parcourue. L'un des meilleurs moyens, pour obtenir ces empreintes, consiste à placer l'animal sur une feuille de papier couverte de noir de fumée que l'on fixe avec un vernis quand il a reçu les tracés. Ce procédé remplace avantageusement celui qui consiste à enduire les pattes de l'animal avec une substance colorante ; cette couleur, en effet, s'épuise bien vite et les tracés ne tardent pas à perdre leur netteté.

(2) Ces tambours sont formés chacun d'une caisse métallique fermée en haut par une membrane de caoutchouc mince et très-peu tendue. Les deux tambours portent chacun un tube métallique qui s'ouvre à leur intérieur et s'adapte à un tuyau de caoutchouc qui les fait communiquer l'un avec l'autre. Si l'on appuie sur la membrane du premier tambour, on expulse une partie de l'air qu'il contient : cet air passe à travers le tube dans le 2e tambour dont il soulève la

La figure 67 montre une disposition qui permet de transmettre très-facilement le mouvement rectiligne d'un point quelconque au *tambour explorateur*, c'est-à-dire à l'instrument qui reçoit ce mouvement et le transmet par un tube au *tambour inscripteur*.

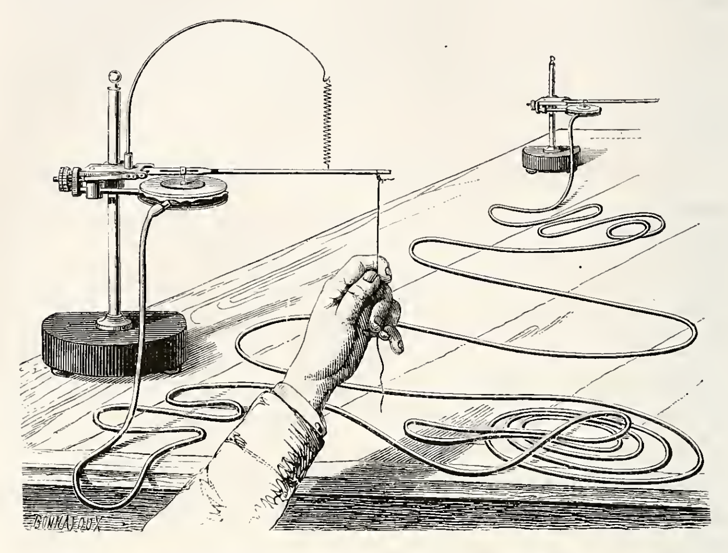


Fig. 67. — Leviers conjugués pour la transmission des mouvements à distance.

Il suffit d'attacher un fil à la pièce dont on veut apprécier le mouvement et de fixer l'autre extrémité de ce fil au levier disposé comme dans la figure 67. En effet, ce levier est tiré par en haut au moyen d'un ressort spiral fixé à une potence, et d'autre part tiré en sens inverse par un fil que l'opérateur tient à la main. Si la main s'abaisse, le levier, cédant à la traction du fil, s'abaissera aussi en tendant le ressort spiral.

membrane. Quand on cesse de presser sur le 1er tambour, la membrane du 2e s'abaisse. C'est cette solidarité d'action des deux tambours qui permet de transmettre un mouvement à distance. Pour cela, on colle sur chacune des membranes un disque d'aluminium relié avec un levier qui s'articule, par une de ses extrémités, à un point fixe placé dans le voisinage du tambour. Cette articulation permet au levier d'exécuter des mouvements verticaux.

Or, si l'on imprime un mouvement à l'un des leviers, cela produit, par l'intermédiaire du disque d'aluminium, une élévation ou un abaissement de la membrane du tambour correspondant. Il s'ensuivra un mouvement semblable, mais de sens inverse, dans le levier conjugué, et si celui-ci est muni d'une plume qui trace sur un papier enfumé, un tracé sera obtenu.

Si la main s'élève, le ressort spiral fera remonter le levier et le fil restera toujours tendu. Tous ces mouvements seront répétés par le levier inscripteur, mais en sens inverse : l'élévation d'un levier provoquant la descente de l'autre (1). Il est très-commode, dans un grand nombre de cas, de transmettre ainsi un mouvement par un simple fil que l'on peut, suivant le besoin, prendre plus ou moins long.

L'inscription d'un mouvement rectiligne peut seule être obtenue dans ces conditions ; elle présenterait peu d'intérêt dans la plupart des cas, mais en combinant l'emploi de deux systèmes de tambour à leviers conjugués, on peut obtenir la forme d'un mouvement quelconque, pourvu qu'il se produise dans un plan. Cette méthode, que j'ai souvent utilisée moi-même, est basée sur ce principe : que tout mouvement qui se passe dans un plan peut-être considéré comme formé par deux mouvements rectilignes perpendiculaires l'un à l'autre.

Lorsque Wheatstone, adaptant à l'extrémité d'une verge vibrante une petite sphère brillante, montra que l'œil perçoit des images qui varient suivant le rapport de fréquence de deux ordres de vibrations produites dans deux plans perpendiculaires l'un à l'autre, l'illustre physicien anglais ouvrit à la méthode graphique une voie nouvelle. Bientôt en effet Kœnig, armant les verges de Wheatstone d'un style écrivant, recueillit le tracé de leurs parcours dans les conditions les plus compliquées.

Ces verges sont des tiges rectangulaires qui, suivant l'épaisseur qu'elles présentent dans les deux sens, peuvent exécuter des vibrations de nombre égal ou de nombres différents dans un sens et dans l'autre.

Plus tard, Lissajoux rendit le phénomène plus facile à comprendre en construisant une machine qui, au moyen d'engrenages, communique à une pointe écrivante deux mouvements rectilignes, perpendiculaires l'un à l'autre. L'appareil de Lissajoux permet de régler à volonté le rapport de fréquence des deux mouvements rectangulaires imprimés au style. En faisant fonctionner la machine avec lenteur, on voit comment la circonférence d'un cercle est engendrée par deux oscillations synchrones ayant la même amplitude ; comment l'inégalité

(1) Si l'on veut que les deux leviers exécutent des mouvements de même sens, il suffit de retourner un des deux appareils.

d'amplitude de deux mouvements synchrones engendre une ellipse dont le grand diamètre correspond à l'oscillation la plus étendue ; comment enfin, des oscillations perpendiculaires entre elles et de fréquences semblables ou inégales donnent naissance à des figures variées. L'ellipse (fig. 68, ligne supérieure), résulte de la combinaison d'un mouvement dans le sens vertical avec un mouvement dans le sens horizontal ; la figure en forme de 8 est due à la combinaison d'une oscillation dans le sens vertical avec deux oscillations dans le sens horizontal ; la figure représentée ligne 3, est produite par 2 oscillations verticales et 3 horizontales ; la figure ligne 4, par 3 verticales et 4 horizontales.

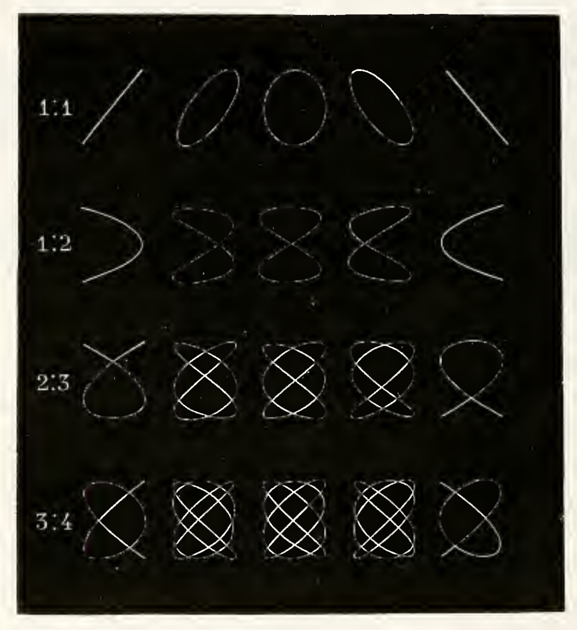


Fig. 68. — Ligne supérieure : une vibration dans le sens vertical pour une vibration transversale ; rapport de 1 à 1, en acoustique *unisson.*

Ligne 2. Une vibration dans le sens vertical pour deux vibrations transversales ; rapport de 1 à 2, *octave.*

Ligne 3. Deux vibrations verticales pour trois vibrations transversales ; rapport de 2 à 3 *quinte.*

Ligne 4. Rapport de 3 à 4 ; *quarte.*

Qu'on imagine les rapports les plus variés entre les deux ordres de mouvements auxquels la pointe traçante est soumise

et l'on obtiendra toutes les figures possibles car, ainsi que nous le disions tout à l'heure, *toute figure susceptible d'être inscrite dans un plan peut-être engendrée par la combinaison de deux mouvements rectilignes perpendiculaires l'un à l'autre.*

Puisqu'il en est ainsi, ne peut-on transmettre à distance un mouvement quelconque, en imprimant à la pointe écrivante les deux mouvements que le corps étudié exécute suivant un plan. Le mode de transmission par l'air se prête fort bien à cette inscription. Il m'a servi, dans un cas où il s'agissait de déterminer le mouvement que l'aile d'un oiseau exécute autour de l'articulation de l'épaule pendant le vol (1).

Enfin, comme la disposition la plus commode est celle que représente la fig. 67 et par laquelle il suffit d'attacher un fil au corps mobile pour transmettre les mouvements qui se produisent suivant la direction de ce fil, j'ai essayé de réaliser la transmission d'un mouvement dans ces conditions simplifiées (2).

L'expérience qui consistait à inscrire la trajectoire de l'aile de l'oiseau nécessitait la construction d'un appareil spécial. Il n'est besoin, avec la disposition nouvelle, que de plusieurs tambours à levier, pareils à celui qui est représenté dans la figure 17 et que l'on combine entre eux de la manière suivante, figure 69.

Sous le nom de *pantographe à transmission*, je désigne l'assemblage de quatre tambours à leviers conjugués répartis en deux groupes.

Le premier groupe de deux tambours forme l'appareil *explorateur* du mouvement ; le second l'appareil récepteur. On peut indifféremment prendre comme explorateur l'un quelconque de ces deux groupes ; dans la description de l'expérience, nous supposerons que c'est le groupe de gauche qui a cette fonction.

Les quatre tambours à levier sont disposés sur un support, de telle façon que leurs membranes soient dans un plan vertical. En outre, les leviers des deux instruments d'un même

(1) On trouvera la description de l'expérience et de l'appareil (*Bibl. des hautes études*, t. I, 1869, p. 228, et *la Machine animale*, p. 244).

(2) *Hautes études*, t. V, p. 39.

groupe, situés dans un même plan horizontal, font entre eux un angle droit.

Dans la figure 69 on voit que le levier explorateur *a* horizontal est conjugué avec le levier récepteur horizontal *a'*; il en est de même des deux leviers verticaux *b* et *b'*. On voit aussi que si on déplace l'un des leviers manipulateurs dans un sens quelconque, le levier conjugué récepteur exécutera un mouvement de même sens.

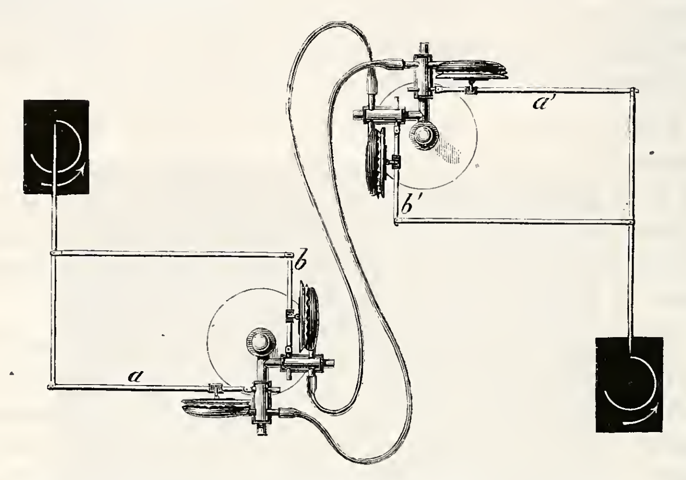


Fig. 69. — Pantographe à transmission du mouvement par l'air. L'appareil est vu d'en haut.

Assemblons, au moyen de tiges articulées en forme de rectangles, les deux tambours de chacun des groupes, et prolongeons l'un des côtés de ce rectangle en le terminant par une pointe écrivante. Tout mouvement imprimé dans le plan horizontal à la pointe de l'explorateur sera produit par la pointe du récepteur.

Dans la figure 69, la pointe de l'explorateur trace un cercle sur un morceau de verre enfumé; la pointe du récepteur trace la même figure.

II. — Chronographie.

Notions des relations de temps. — Chronomètres. — Pointage sur un papier qui se déplace. — Cylindres tournants et régulateurs. — Contrôle du mouvement d'un cylindre au moyen du diapason. — Transmission des indications chronographiques. — Imperfection des signaux. — Signaux électriques. — Signaux à air.

Pour l'estimation des phénomènes de courte durée, l'emploi des chronomètres les plus parfaits trouve sa limite pratique dans l'insuffisance de nos sens. Si l'aiguille d'un de ces instruments parcourt le cadran, en s'arrêtant à toutes les secondes ou à tous les quarts de seconde, on a peine à reconnaître la position exacte qu'elle occupe au début et à la fin d'un phénomène ; une erreur d'un quart de seconde est alors très-facile à commettre. On doit donc considérer comme un progrès notable l'emploi du chronomètre à pointage : l'aiguille, chargée d'encre à sa pointe, s'applique contre le cadran par la pression d'une détente et laisse la trace de la position qu'elle occupait à un premier instant ; si l'on provoque un second pointage à la fin du phénomène, on trouve sur le cadran deux points séparés l'un de l'autre par un nombre de divisions qui mesure le temps écoulé.

Mais, si le temps à mesurer excédait un tour de cadran, s'il correspondait à un grand nombre de minutes par exemple, on risquerait de commettre une erreur sur ce nombre. Le pointage du temps doit alors se faire sur un papier qui chemine avec une vitesse connue, et dont la longueur soit fort grande (1).

La difficulté principale, dans ces mesures graphiques du temps, c'est d'avoir, pour y pointer les signaux, une surface animée d'une vitesse parfaitement régulière ou parfaitement connue. Pour obtenir l'uniformité parfaite des mouvements

(1) C'est ainsi qu'Eytelwein, voulant compter le nombre de coups frappés en un temps donné par un bélier hydraulique, fit défiler, au moyen d'un rouage, une longue bande de papier sur laquelle chaque coup venait laisser sa trace. On pouvait lire, à la fin de l'expérience, le nombre de coups de bélier frappés, en une heure ou en une minute, si la vitesse de translation était exactement connue.

d'horlogerie, on se sert des *régulateurs*. L'un des plus simples est celui de Foucault. La marche en est sensiblement uniforme et comme on peut en régler la vitesse, il est relativement facile d'estimer avec certitude l'intervalle de temps qui sépare deux signaux. Le régulateur de Villarceau semble plus parfait encore et présente un avantage : celui de pouvoir prendre des vitesses qui varient, du simple au double, suivant que l'appareil est incliné ou vertical. Enfin, Helmholtz a imaginé un régulateur électrique qui, paraît-il, est également d'une précision très-grande.

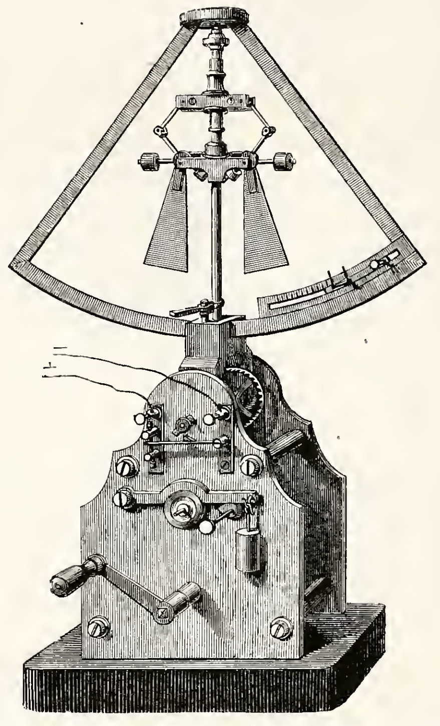


Fig. 70. — Mouvement d'horlogerie muni du régulateur Villarceau. Cet appareil est destiné à faire tourner uniformément le cylindre sur lequel on inscrit les signaux.

Chronographes. — Comme ces appareils sont coûteux et qu'il est parfois difficile de se les procurer, il est très-utile, en pratique, de contrôler les mesures du temps au moyen d'un *chronographe à indications continues*.

Thomas Young imagina de faire inscrire sur un cylindre

tournant les vibrations d'une verge métallique munie d'un style léger ; puisque ces mouvements sont isochrones, chacune des ondulations tracées sur le cylindre correspond à une division du temps toujours égale à elle-même. Duhamel employa le diapason au même usage ; ce fut un nouveau progrès dans la chronographie. On peut, en effet, savoir avec une exactitude extrême le nombre de vibrations qu'un diapason exécute en une seconde ; cela tient à la précision avec laquelle on compare entre eux et on règle ces instruments : soit par la méthode optique de Lissajoux, soit par la méthode acoustique (méthode des sons résultants) de Kœnig (1).



Fig. 71. — Tracés d'un diapason chronographe.

Suivant l'approximation avec laquelle on veut mesurer le temps, et surtout suivant la vitesse du cylindre sur lequel on inscrit les signaux, on doit prendre des diapasons dont les nombres varient. Les diapasons de 50 à 500 vibrations par seconde sont les plus fréquemment employés. Quelquefois, il faut avoir des divisions du temps plus grandes ; le dixième de seconde exige des instruments en général assez volumineux et encombrants.

Pour plus de commodité, on peut recourir à la méthode d'inscription indirecte des vibrations (fig. 72) : On suspend, en un point quelconque, le diapason dont une des branches porte un curseur relié, au moyen d'une bielle, avec la membrane d'un tambour à air ; celui-ci communique par un tube avec un tambour à levier qui trace sur le cylindre une ondulation pour chaque vibration du diapason.

Dans la plupart des cas, il est assez incommode de tracer directement les mouvements d'un diapason quelconque, surtout quand un grand nombre d'aûtres signaux doivent être inscrits en même temps. Pour parer à cet inconvénient,

(1) M. Kœnig m'a fait constater, par la méthode des battements, le parfait accord de diapasons qui donnaient plus de 20,000 vibrations doubles par seconde.

j'ai construit un appareil (fig. 73) que je nomme *chronographe* et qui consiste en un style léger vibrant à l'unisson d'un diapason entretenu par l'électricité.

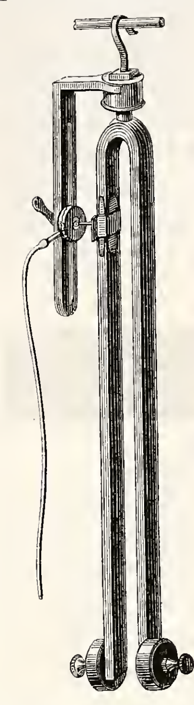


Fig. 72. — Diapason de 10 vibrations doubles disposé pour envoyer ses vibrations à un tambour à levier.

Trois parties distinctes constituent l'appareil : une pile, un diapason interrupteur et le chronographe. Cette dernière pièce consiste en un style effilé, fixé à l'extrémité d'une lame d'acier et muni d'une petite masse de fer doux. Si le style est destiné à inscrire le centième de seconde, il faut que la lame d'acier qui le porte ait une longueur déterminée. A cet effet, la lame est saisie dans un étau mobile qu'une vis de réglage permet de déplacer de manière à changer la longueur de la partie vibrante. A côté du style armé d'une petite masse de fer doux est un petit électro-aimant qui en entretient les vibrations en produisant une série d'attractions renouvelées cent fois par seconde. Il faut donc qu'un courant électrique soit envoyé cent fois par seconde dans le petit électro-aimant qui agit sur le style ; c'est à cela qu'est employé le diapason interrupteur.

Au dernier plan, sur la figure 73, on voit une pile dont l'un des fils se rend à un diapason de cent vibrations par seconde, sem-

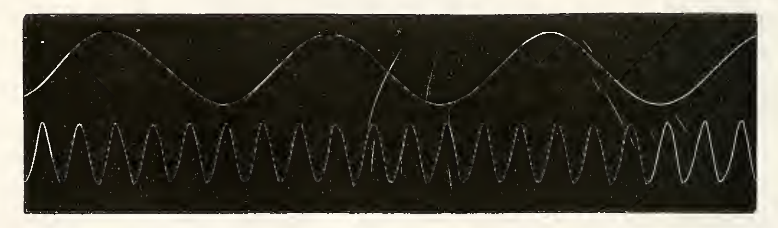


Fig. 72 bis. — Tracés d'un diapason à transmission. 10 vibrations doubles par seconde ; ligne supérieure, axe rapide ; ligne inférieure, axe plus lent.

blable à ceux que M. Mercadier emploie directement comme chronographes. Ce diapason n'a ici d'autre rôle que d'inter-

rompre le courant de la pile. Après avoir traversé l'interrupteur, le fil électrique s'accole à l'autre fil de la pile et tous deux, isolés l'un de l'autre, cheminent dans un cable flexible, pénètrent dans le manche du chronographe et se terminent chacun dans l'un des bouts de la bobine électro-magnétique dont l'action entretient les vibrations du style écrivant.

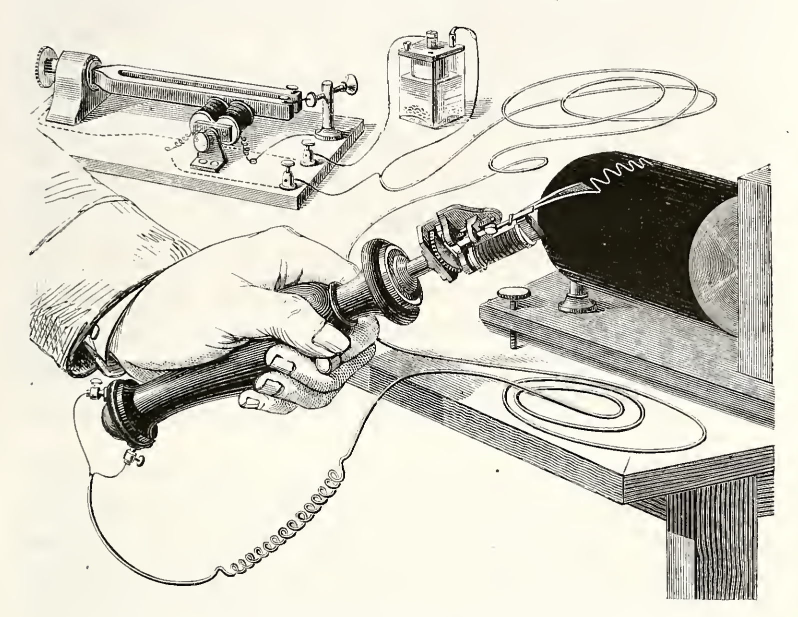


Fig. 73. — Chronographe tenu à la main et donnant continuellement 100 vibrations doubles par seconde.

Si l'appareil est réglé de façon que le style du chronographe ait des vibrations propres de même nombre que celles du diapason, aussitôt que le circuit de la pile est fermé, on voit le style du chronographe vibrer à l'unisson ; mais si le style du chronographe n'est pas soigneusement accordé pour le nombre de vibrations que le diapason exécute, celui-ci vibre seul. Il suffit alors d'un léger tâtonnement pour amener, au moyen de la vis de réglage, le style au nombre voulu de vibrations ; aussitôt on le voit entrer en mouvement, et ses vibrations durent tant que la pile conserve une énergie suffisante, c'est-à-dire indéfiniment.

Un même chronographe peut donner, à volonté, différents nombres de vibrations par seconde ; il faut alors prendre

comme interrupteur des diapasons du nombre que l'on veut obtenir et régler le chronographe à l'unisson de l'interrupteur employé.

Enfin, avec un même interrupteur, on peut donner au chronographe des nombres de vibrations qui varient du simple au double. Ainsi, avec un diapason de 100, on peut faire vibrer le chronographe deux cents fois par seconde ; il suffit pour cela d'accorder le style à l'octave aiguë du diapason.

L'inscription continue du temps, au moyen de vibrations d'une fréquence connue, est si exacte et si commode que, même avec l'emploi des régulateurs du mouvement, on recourt encore à l'inscription chronographique toutes les fois qu'il faut mesurer des durées très-courtes. Il suffit alors de compter sur le tracé combien, entre les signaux qui annoncent le début et la fin d'un phénomène, sont inscrites de vibrations dont chacune représente $^1/_{10}$, $^1/_{100}$ ou $^1/_{1000}$, de seconde. Dans certains cas, on peut rendre lisible la durée qui correspond à $^1/_{25000}$ de seconde.

Des signaux. — Quand la précision est très-grande dans la mesure du temps, l'imperfection devient relativement très-grande dans la production des signaux qui doivent indiquer le commencement et la fin d'un phénomène. Les astronomes ont reconnu, les premiers, que personne ne saurait pointer un phénomène au moment précis où il se produit ; le signal retarde toujours un peu sur l'instant auquel il devrait correspondre; ils ont appelé *équation personnelle* ce retard, variable pour chaque observateur. Il est clair que notre estimation d'un instant quelconque est entachée de cette erreur. Aussi, dans les mesures délicates, faut-il recourir aux signaux automatiques et forcer le phénomène lui-même à inscrire mécaniquement son début et sa fin.

Les signaux électriques sont les meilleurs que l'on possède, grâce à la rapidité avec laquelle ils se transmettent, du point où le phénomène se produit, à celui où il doit s'inscrire. Ils présentent en outre cet avantage, qu'ils n'exigent, pour se produire, que la force motrice nécessaire pour rompre ou fermer un courant de pile. Il semble donc que ces signaux soient parfaits.

Mais les exigences toujours croissantes de l'expérimentation ont bientôt montré que l'inscription électrique, quel que fût le procédé employé, était encore imparfaite. M. Marcel Deprès s'est attaché à perfectionner les appareils électriques qui fournissent des signaux et est arrivé à des résultats d'une admirable précision (1).

Pour obtenir des signaux plus nets, M. Deprès s'est servi d'électro-aimants, en s'attachant à combattre les deux influences qui diminuent l'instantanéité de leurs signaux, c'est-à-dire l'inertie de l'armature et la durée des phases d'aimantation et de désaimantation.

Soient (fig. 74) deux bobines électro-magnétiques qui, au moment où le courant passe, attirent le fer doux placé au-dessus d'elles, et abaissent le style écrivant, de manière à tracer la ligne horizontale inférieure ; dès que le courant sera rompu, un ressort antagoniste relèvera le levier qui tracera la ligne supérieure jusqu'à la prochaine clôture du courant de pile. Ces alternatives d'élévation et d'abaissement de la ligne tracée semblent se traduire par des ascensions verticales, si l'on re-

(1) L'auteur commence par faire ressortir les imperfections de certains signaux électriques : ceux qu'on obtient, par exemple, au moyen de l'électrolyse, quand une électrode métallique, frottant sur un papier humide et imprégné de certaines solutions salines, laisse une trace colorée des instants où un courant électrique a passé. Ces signaux sont incapables de marquer avec exactitude le début et surtout la fin d'un phénomène, à cause des traces vagues e diffuses qu'ils laissent sur le papier.

En balistique, on doit obtenir, sur un cylindre qui tourne avec une rapidité extrême, le signal des instants où le projectile passe au travers d'une série de cibles plus ou moins éloignées les unes des autres. On s'est servi jusqu'ici, pour signaler ces passages, de l'étincelle de fortes bobines d'induction que l'on faisait éclater entre une pointe métallique et un cylindre argenté recouvert de noir de fumée. Cette étincelle, provoquée à chaque passage du projectile à travers une cible où il coupe les fils d'un circuit de pile, n'éclate pas suivant la normale entre la pointe et le cylindre, mais se dévie en divers sens, suivant le chemin où elle trouve la meilleure conductibilité dans la petite couche d'air qu'elle doit traverser. Même dans les cas où la pointe métallique touche le cylindre et frotte constamment sur sa surface, on n'est pas à l'abri de ces déviations. (*Journal de physique théorique et appliquée*, t. IV, nº 38, p. 39.)

Ajoutons que l'étincelle d'une machine d'induction n'est pas simple, ainsi que l'a montré Nyland par le procédé de Donders * et que, sur la surface du cylindre, se trouvent souvent une série de traces multiples qui gênent l'estimation précise de l'instant du signal.

* Voy. *Archives Néerlandaises*, t. V, p. 292.

cueille les signaux sur un papier animé d'une translation peu rapide, un ou deux centimètres par seconde. Mais, si la vitesse de translation est grande, comme dans les cas où on emploie un cylindre à rotation rapide, on constate que le passage du style entre deux lignes se fait lentement.

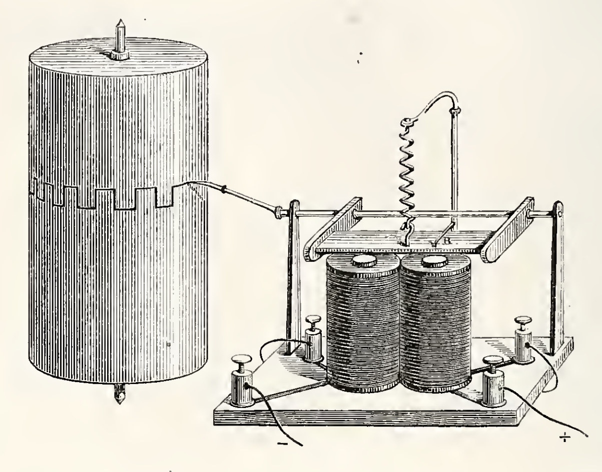


Fig. 74. — Appareil à signaux électro-magnétiques inscrivant sur le cylindre

Outre que le signal met à s'accomplir un temps appréciable, il retarde sur le moment de la clôture ou de la rupture du courant. Ce retard, il faut le connaître pour estimer le véri-

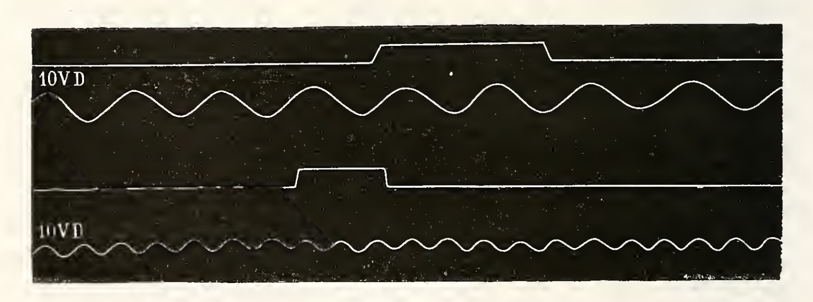


Fig. 75. — En haut la ligne du signal électrique : ascension du tracé ; signal de désaimantation ou de rupture du courant. — Au-dessous, tracé du diapason à transmission : 10 vibrations doubles. (Tracés recueillis sur un axe rapide.)
En bas, même signal et même tracé chronographique (axe plus lent).

table instant du début ou de la fin d'un phénomène ; de plus,

il faut le réduire autant que possible, afin de multiplier le nombre de signaux que l'appareil peut exécuter en un temps donné.

Dans le cas où les signaux devraient se suivre à très-court intervalle, il faut abréger la durée des périodes de désaimantation et de réaimantation dans les appareils. C'est ce que M. Deprès a réussi à obtenir en perfectionnant les appareils électro-magnétiques. Ce savant a réduit à $\frac{1}{4000}$ de seconde la durée de la désaimantation et du mouvement qui l'accompagne ; il a réduit seulement à $\frac{1}{500}$ de seconde celle de la réaimantation, de sorte que ses appareils peuvent donner de 400 à 450 signaux différents en une seconde, avec un seul élément de Bunsen (1). En plaçant dans un circuit dérivé sur le courant de la pile une bobine munie d'un fer doux, M. Deprès abrège encore la durée des signaux (2) ; il en peut obtenir de 700 à 800 par seconde.

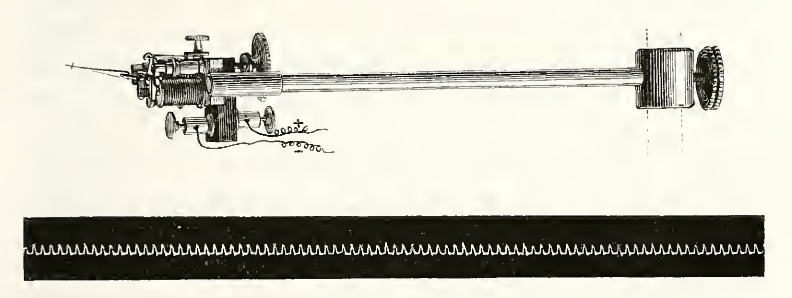


Fig. 76. — Appareil à signaux électriques de M. Deprès ; Signaux de cet appareil actionné par un diapason interrupteur de 500 vibrations simples par seconde. (Héliogravure.)

(1) Pour arriver à une grande rapidité dans les signaux, l'auteur diminue considérablement la masse du fer doux qui sera soumis à la traction de l'électro aimant; il donne aussi une légèreté extrême au style, à toutes les pièces enfin, qui doivent être animées de vitesse. D'autre part, il donne une force considérable au ressort qui doit produire l'arrachement de l'armature au moment de la désaimantation. Ce ressort exerce une traction d'environ deux cents grammes sur une armature qui ne pèse que 120 milligrammes; il s'ensuit que la vitesse avec laquelle le signal de désaimantation se produit est extrêmement grande. (La vitesse du style, au bout d'un millimètre de parcours, serait alors de 10 mètres par seconde.)

(2) Il se produit alors, aux moments de la rupture et de la clôture des courants de pile, des extra-courants qui favorisent la désaimantation et surtout donnent à l'aimantation une rapidité considérable; on peut ainsi augmenter la rapidité des signaux.

Dans cette figure, les signaux sont provoqués par un diapason qui donne 500 vibrations simples par seconde. On constate qu'un signal complet de l'instrument, c'est-à-dire une rupture suivie de clôture, dure beaucoup moins de $\frac{1}{500}$ de seconde, puisque après chacun de ces signaux, le style reste en repos pendant une période assez longue. On eut donc pu obtenir beaucoup plus de 500 signaux par seconde.

Un tel appareil sera d'une utilité extrême dans un grand nombre d'expériences.

Des signaux à air. — Dans bien des cas, le signal électrique peut être remplacé par un signal transmis par l'air.

L'appareil décrit figure 67 (les tambours à leviers conjugués) suffit pour inscrire sur le cylindre l'instant précis du début d'un phénomène et celui de sa fin. Admettons, en effet, qu'à un moment donné, une traction ou un choc fasse mouvoir le levier n° 1 ; le levier n° 2 tracera sur le cylindre le signal de ce mouvement ; un second signal se tracera de même ; on aura de cette façon, des tracés à peu près identiques à ceux que représente la figure 75. Enfin, le tracé d'un chronographe ou d'un diapason mesurera, d'après le nombre de vibrations qu'il a inscrites, le temps qui s'est écoulé entre les deux signaux. Mais, dira-t-on, le mouvement ne se transmet pas d'une manière instantanée d'un levier à l'autre et cela peut causer une erreur dans l'appréciation du temps à mesurer.

Le temps qui s'écoule entre le mouvement imprimé au premier levier et celui qui est inscrit sur le second est constant, pour un même tube, à une même température. Ce retard, puisqu'il est constant, n'a donc aucune influence sur l'intervalle qui sépare les deux signaux successifs, et par suite, n'altère pas la durée du temps à mesurer ; tout au plus pourrait-il gêner dans la détermination de l'instant auquel s'accomplit le phénomène qu'on observe, si cet instant devait être rapporté aux indications d'une horloge. Pour une estimation de ce genre, il faudrait évaluer le temps nécessaire à la transmission du signal, ce qui est facile à déterminer.

Du reste, pas plus que les signaux à air, les signaux électriques ne sont d'une instantanéité absolue : le retard d'aimantation ou de désaimantation doit entrer en ligne de

compte dans la détermination absolue d'un *instant*. Nous reviendrons sur ce sujet dans le prochain chapitre, à propos des applications de la méthode graphique aux mesures du temps.

Nous venons d'examiner les cas où l'on a besoin de mesurer des intervalles de temps extrêmement court ; il en est d'autres, au contraire, où la durée des actes qu'il s'agit de déterminer est considérable. La méthode graphique se prête également bien à ces deux sortes de mesures. On peut, pour tous les cas, conserver les mêmes signaux électriques : la rapidité extrême de leur fonctionnement, si elle n'est pas nécessaire dans les expériences de longue durée, n'est du moins pas nuisible ; mais il faut, suivant le besoin, changer la vitesse du mouvement rotatif du cylindre et lui faire développer, non plus 4 mètres de papier par seconde, mais 1 centimètre, 1 millimètre et même moins. En effet, certains actes ont une durée si longue, qu'entre leur commencement et leur fin, il s'écoule des minutes, des heures, des jours et plus encore. Rien de plus facile que de construire des appareils d'horlogerie qui donnent au cylindre des mouvements réguliers et très-lents.

Pour plus de sûreté, dans les mesures du temps, il faudra, en général, contrôler la vitesse du cylindre par un tracé chronographique. Mais les périodes d'oscillation du chronographe devront être d'autant plus lentes que le cylindre tournera avec moins de vitesse. Quand, par exemple, il ne passera que 10 ou 20 centimètres de papier par seconde, le diapason qui inscrit 1/10 de seconde sera suffisant. Pour 1 ou 2 centimètres à la minute, il suffira de pointer les secondes, au moyen d'une horloge dont le balancier rompra et fermera tour à tour le courant de la pile qui produit les signaux. Enfin, pour des rotations plus lentes encore, on ne pointera plus que les minutes ou les heures, au moyen de dispositions appropriées.

En somme, la méthode graphique, dans les mesures du temps, l'emporte sur toutes les autres ; elle supplée à l'insuffisance des sens dans les mesures d'actes extrêmement brefs, à la patience de l'observateur dans la mesure des actes de longue durée.

III. — Applications de la chronographie.

Détermination de l'instant où se produit un phénomène. — Mesure des durées. — Successions ou synchronisme. — Fréquence. — Régularité. — Périodicité.

La chronographie trouve son application partout où doit être effectuée une détermination précise de l'instant auquel se produit un phénomène, de la durée, de la fréquence ou de la régularité de certains actes successifs. Aussi, toutes les sciences expérimentales auront-elles à l'employer, quand elles voudront pousser la rigueur des mesures du temps plus loin que ne le permet l'emploi du chronomètre à cadran.

A) *Détermination de l'instant où se produit un phénomène.* — Ce problème ne se pose guère qu'en astronomie; pour le résoudre, il faut disposer d'une horloge qui pointe électriquement les secondes sur un cylindre tournant (1). Si l'on n'inscrit pas sur un papier sans fin, on y supplée au moyen d'un mécanisme qui entraîne le style traceur de telle façon, qu'à chaque tour de cylindre, la pointe se soit graduelement déplacée suivant la génératrice. De cette façon, le signal des secondes trace ses indications sur une spirale et peut écrire ainsi pendant un temps très-long.

A côté du pointeur des secondes est disposé le style qui signalera l'instant du phénomène observé. La position du signal par rapport au tracé des secondes déterminera l'instant du phénomène; ainsi que cela se voit dans le cas représenté fig. 77 : le phénomène se serait produit entre la deuxième et la troisième seconde et un peu après la moitié de cet intervalle de temps.

(1) Plusieurs dispositions peuvent être employées à cet effet. Tantôt le pendule de l'horloge, chaque fois qu'il passe par la verticale, rencontre un petit ressort qu'il déplace, et rompt ainsi un courant électrique qui fait agir un signal pareil à celui qui est représenté fig. 77; tantôt, muni d'une lame de mica, ce pendule coupe une goutte de mercure qui se referme après son passage, en rétablissant un courant de pile un instant interrompu. J'ai vu fonctionner ce mécanisme en Hollande, dans l'observatoire astronomique d'Utrecht, et dans le laboratoire de physiologie du professeur Donders.

Si l'on voulait plus de précision encore, on emploierait un cylindre à rotation plus rapide, et l'on inscrirait, à côté du pointage des secondes, les vibrations d'un chronographe. L'instant où se produit le phénomène pourrait ainsi être déterminé en secondes et fractions aussi petites qu'il serait nécessaire. Enfin, dans cette détermination absolue d'un instant, il faudrait tenir compte du retard des signaux sur l'acte qu'ils doivent inscrire (1).

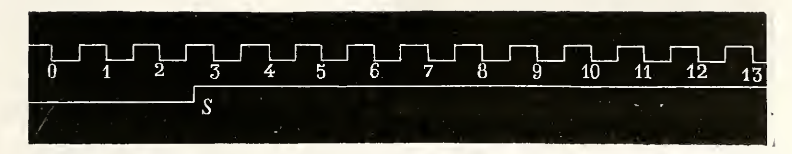


Fig. 77. — Ligne supérieure : tracé des secondes, 1, 2, 3, etc., inscrites électriquement. — Ligne inférieure : signal d'un phénomène; il se produit à l'instant S.

Quand deux astronomes font une détermination de longitude, une horloge inscrit électriquement la seconde dans les deux observatoires à la fois. Le premier observateur signale, par rapport au temps de cette pendule, l'instant du passage d'une étoile et ce signal s'écrit dans les deux postes en même temps ; le deuxième observateur signale de la même façon le passage de l'étoile au méridien de son observatoire et ce signal s'écrit aussi dans les deux postes à la fois. Chaque observateur possède donc un double tracé : celui des secondes de l'horloge commune aux deux postes et celui des deux signaux de passages : l'un fait par lui, l'autre fait par son collègue. Cet intervalle mesure, en secondes de temps, la différence de longitude des deux postes d'observation.

Or, dans une pareille détermination, si les signaux électriques causent une erreur absolue de quelques millièmes de seconde, cela importe peu si ce retard est constant. En outre, si les retards sont inégaux pour les deux appareils à signaux employés dans les deux postes, la différence qu'ils présentent n'est rien en comparaison de l'erreur qui peut tenir à la différence de *l'équation personnelle* des deux astronomes, c'est-

(1) En pratique ce retard est négligeable, soit qu'on emploie les signaux électriques, soit qu'on se serve de la transmission par l'air à très-courte distance

à-dire à la différence du temps qui s'écoule entre le passage réel de l'étoile au méridien et l'instant où chacun des observateurs signale ce passage.

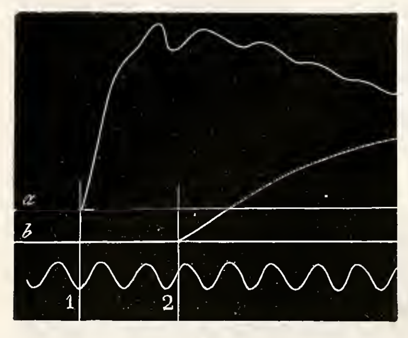


Fig. 78. — Mesure de la vitesse de transmission des signaux dans les tubes à air. Ligne *a*, signal *b*, retard pour 1 mètre de tube. Ligne *b*, signal 2, retard pour 31 mètres. Différence, 2 1/3 vibrations de 250 par seconde. — Vitesse, 325 m.

Toutefois, il peut être utile, dans certains cas, de connaître exactement le retard de transmission d'un signal ; nous allons indiquer le moyen de le déterminer.

Retard des signaux à air. — Ce retard est proportionnel à la longueur et à l'étroitesse des tubes employés. Quant à l'élasticité des tubes, elle est négligeable, car la pression de l'air nécessaire à la transmission des signaux est trop faible pour mettre en jeu cette élasticité.

Pour mesurer la vitesse de transmission du mouvement de l'air dans les tubes, on prend l'appareil décrit fig. 67 et on place sur un même support les deux tambours à levier, tous deux munis de styles dont les pointes sont disposées bien verticalement l'une au-dessus de l'autre. On fait tourner le cylindre et pendant que les deux styles immobiles tracent, sur le papier noirci, deux lignes droites parallèles, on frappe sur le tube de transmission de manière à l'aplatir. L'air, expulsé du tube par cette pression soudaine, se porte dans deux directions opposées et actionne chacun des tambours à levier. Deux signaux s'ensuivent (fig. 78), qui sont superposés, c'est-à-dire synchrones, quand le tube a été frappé au milieu de sa longueur, mais qui se succèdent à certain intervalle, si l'ébranlement de l'air a dû parcourir une plus grande longueur de tube dans un sens que dans l'autre. On mesure au chronographe le temps qui s'écoule entre les deux signaux, et si, de chaque côté du point où le tube a été frappé, il y a, pour arriver aux tambours à levier, une différence de longueur de 1 mètre, de 5 mètres, de 20 mètres, etc., l'in-

tervalle de temps qui sépare les deux signaux mesure le temps nécessaire à parcourir ces longueurs de tube. On en déduit la vitesse de transmission des signaux à air.

Cette vitesse, voisine de celle du son dans l'air, s'en approche d'autant plus qu'on emploie des tubes plus larges. Pour les tubes dont je me sers habituellement (4 millimètres de diamètre), elle se réduit à 280 mètres par seconde.

Toutes les fois qu'on emploie deux appareils à signaux transmis par l'air, il est bon de donner la même longueur aux tubes de transmission : cela permet, en uniformisant le retard, de le négliger entièrement dans les déterminations de synchronisme ou de durée.

Retard des signaux électriques. — Helmholtz a imaginé une méthode qui permet d'estimer, avec une précision extrême, le retard d'un signal électrique. A cet effet, il faut, sur le cylindre, déterminer la position où le signal aurait lieu s'il n'y avait pas de retard, et la comparer à celle que le signal occupe réellement. On dispose l'expérience de telle sorte que le cylindre lui-même, à un certain moment de sa rotation, rompe ou ferme le courant électrique qui provoque le signal.

Dans une première expérience, on fait tourner le cylindre avec une lenteur extrême au moment où va se produire le signal électrique. Dès lors, la vitesse du cylindre pouvant être considérée comme nulle, le signal ne subira aucun déplacement. Dans une autre expérience, on donne au cylindre son mouvement rotatif et l'on fait inscrire le signal. Le tracé, dans ce deuxième cas, se trouve inscrit un peu plus loin que la première fois, ce qui tient à ce que, depuis le moment où la rupture du courant de pile s'est faite jusqu'à celui où le signal s'est écrit, le cylindre a tourné d'une certaine quantité. Cette quantité, mesurée au chronographe, donne exactement le retard du signal.

M. Marcel Deprès a déterminé, par une méthode analogue, le retard d'aimantation et le retard de désaimantation de ses appareils à signaux électriques. Pour cela, il a incrusté dans l'un des fonds du cylindre tournant un secteur de caoutchouc durci. Deux frotteurs métalliques, en contact avec le fond du cylindre, ferment le courant tant qu'ils

touchent les parties métalliques ; le courant est rompu quand le secteur isolant passe au-dessous d'eux. Après avoir déterminé, *sans vitesse*, la position des signaux de clôture et de rupture du courant, on cherche la position nouvelle de ces signaux quand le cylindre a toute sa vitesse (1).

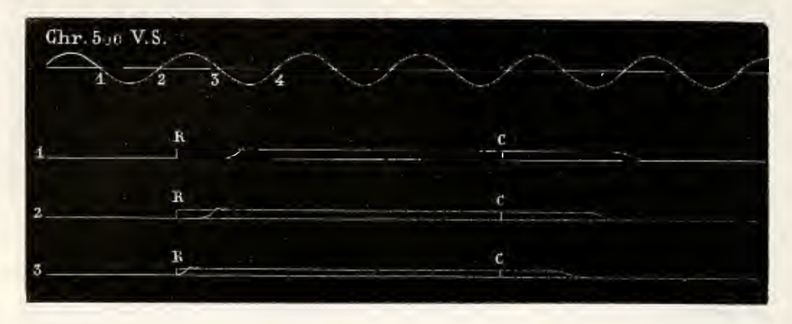


Fig. 79. — Tracé supérieur chronographe de 500 vibrations simples ; les chiffres 1, 2, 3, 4, marquent les temps correspondant à $^1/_{500}$ de seconde. — Ligne 1, R, instant de la rupture du courant de pile. La courbe qui, partant de la ligne inférieure, s'élève obliquement à la ligne supérieure, est le mouvement du style au moment où la désaimantation se produit. La durée du retard mesuré sur le chronographe dépasse $^1/_{500}$ de seconde ; c'est le retard de désaimantation. C, clôture du courant de pile : le moment où la ligne supérieure redescend au contact de l'inférieure correspond au signal d'aimantation ; son retard est de $^1/_{200}$ de seconde environ. — Ligne 2 et 3. Diminution graduelle des retards de désaimantation et d'aimantation.

Dans ces déterminations, M. Deprès a trouvé (fig. 79) des retards plus ou moins grands, dont il pouvait faire varier la durée ; dans certains cas, le signal de clôture du courant retardait de $^1/_{5000}$ (retard d'aimantation), tandis que le signal de rupture retardait de $^1/_{500}$ (retard de désaimantation).

B) *Détermination de la durée d'un phénomène.* — Cette mesure n'est autre que celle du temps qui s'écoule entre deux signaux dont l'un correspond au début et l'autre à la fin du phénomène dont on cherche à connaître la durée. Dans le cas cité plus haut, où deux astronomes mesurent la différence de longitude de deux méridiens, il mesurent en réalité une durée :

(1) La rupture d'un circuit de dérivation est employée pour forcer, à un moment donné, le courant de pile à passer par le fond du cylindre, et à subir des clôtures et des ruptures alternatives.

celle de la rotation terrestre qui amène, en face de l'étoile observée, les méridiens de deux lieux différents.

En balistique, on détermine le temps qui s'écoule entre les passages d'un boulet au travers de deux cibles successives, distantes l'une de l'autre d'un intervalle connu, et de cette mesure on déduit la vitesse du projectile.

Le même principe m'a servi à estimer la vitesse plus modeste des ondes liquides à travers les tubes (voy. mémoire III, fig. 60 et suiv.), en mesurant le temps qui s'écoule entre les signaux du passage de cette onde en deux points du tube dont on connaît l'intervalle.

Une autre fois (voy. mémoire VI, fig. 120), ayant à déterminer le temps que dure l'abaissement de l'aile d'un oiseau mécanique, suivant la vitesse de sa translation horizontale, j'ai recouru à la mesure du temps qui séparait deux signaux dont l'un marquait le début de l'abaissement de l'aile, tandis que l'autre en annonçait la fin.

L'une des mesures les plus difficiles qu'on ait à faire en physique est celle de la durée d'un choc (1). On verra, à propos de la *mesure des vitesses*, un procédé qui permet la solution de ce problème.

C'est à l'emploi de la méthode graphique qu'on doit les belles expériences de Helmholtz sur la détermination du temps qui s'écoule entre l'excitation électrique d'un muscle et l'apparition du mouvement provoqué. C'est encore à cette méthode qu'est due la mesure de la vitesse de l'agent nerveux moteur. Dans toutes ces expériences, l'organe est excité à un moment connu de la rotation du cylindre et le signal s'écrit un certain temps après.

Pour l'estimation du *temps perdu* d'un muscle, c'est-à-dire du retard du mouvement sur l'excitation qui le provoque, une seule expérience suffit.

Dans la mesure du temps qu'emploie l'agent nerveux à parcourir une certaine longueur de nerf, deux expériences sont nécessaires (fig. 80) : l'une donne le retard du mouvement

(1) Des essais ont été faits au moyen de la méthode de Pouillet, c'est-à-dire en mesurant la déviation de l'aiguille d'un galvanomètre qui traverse un courant de pile pendant le temps où le corps choquant et le corps choqué sont en contact. Nous n'avons pas à nous occuper de cette méthode peu précise.

sur l'excitation électrique, lorsque celle-ci porte sur un point du nerf assez voisin du muscle ; l'autre mesure le retard qui se produit quand l'excitation électrique s'adresse à un point du nerf situé plus loin du muscle et séparé du premier par une longueur de nerf qu'on a exactement mesurée.

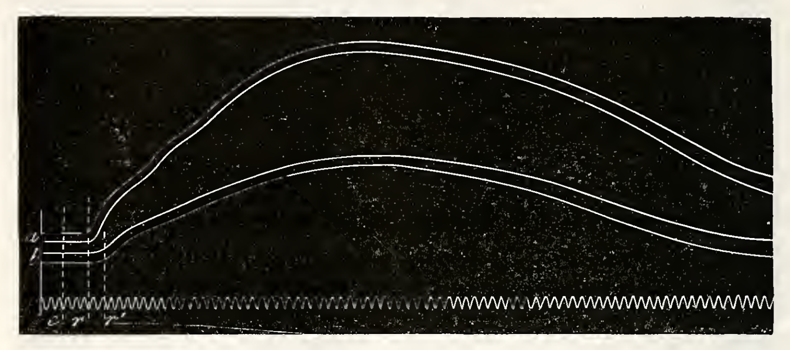


Fig. 80. — Mesure de la vitesse de l'agent nerveux. Chronographe de 250 vibrations doubles *e*, moment de l'excitation du nerf. — *r*, retard de la secousse quand on excite le nerf très-près du muscle. — *r'*, retard quand on excite le nerf plus loin du muscle. (*r'* — *r* mesuré au chronographe, exprime le temps que l'agent nerveux a mis à parcourir la longueur de nerf qui sépare les deux points excités).

Toute la rigueur de ces mesures dépend de l'exactitude des appareils chronographiques qui servent à mesurer la valeur de ces retards ; aussi, doit-on, dans ces expériences, recourir aux chronographes les plus rapides et à ceux dont les indications se font par angles brusques dont la position se détermine d'une manière précise.

C) *Succession et synchronisme de deux phénomènes.*— Je crois avoir introduit le premier, en physiologie du moins (1), la méthode qui permet d'établir les rapports de synchronisme ou de succession de deux mouvements. Nos sens ne se prêtent que très-incomplétement à de pareilles mesures, tandis que l'emploi de signaux enregistrés les fournit aisément avec une précision parfaite.

Au moyen de styles superposés, en nombre plus ou moins considérable, on peut estimer les rapports de succession ou

(1) Voir les expériences sur le mouvement des liquides, *Annales des Sciences naturelles* 1857, 2e série, t. VIII, Zoologie, p. 330 et suiv.

de synchronisme d'autant de phénomènes qu'il y a de styles employés.

C'est avec trois leviers superposés que, Chauveau et moi, nous avons mesuré l'intervalle qui sépare la systole des oreillettes de celle des ventricules du cœur, ainsi que la coïncidence parfaite de la systole ventriculaire avec la pulsation cardiaque. On mesure, de la même manière, les intervalles qui séparent les moments d'apparition du pouls dans les différentes artères d'un homme ou d'un animal.

Dans ces expériences, les tracés obtenus (voy. fig. 12, p. 25) faisaient plus que signaler l'instant d'apparition des différents phénomènes observés. Ces tracés renfermaient des renseignements d'un autre ordre, relatifs à l'énergie et aux phases diverses du mouvement de chaque cavité du cœur; aussi reviendrons-nous sur ces expériences, à propos de l'étude des *mouvements* proprement dits (1).

La succession des appuis et levés des pieds, dans la marche de l'homme, et surtout dans les allures si variées des quadrupèdes, était difficile à déterminer par l'observation directe. Les auteurs qui avaient étudié cette question s'étaient servi parfois de signaux acoustiques, renonçant à juger au moyen de la vue cette rapide succession de mouvements.

La méthode graphique m'a fourni très-simplement la solution de ce problème. Deux styles inscripteurs pour l'homme, quatre pour les quadrupèdes, traçaient, sur un cylindre enfumé, chacun les mouvements d'un pied, c'est-à-dire l'instant où le pied frappe le sol et celui où il se soulève (2). Les signaux

(1) L'emploi des signaux à air présente, dans certains cas, une supériorité marquée sur celui des signaux électriques : c'est lorsqu'il s'agit d'inscrire un acte dont le début serait trop faible pour mettre en mouvement un interrupteur électrique ; ce dernier risquerait, en effet, de n'agir qu'au moment où le mouvement dont il doit marquer le début aurait acquis une énergie suffisante pour rompre un courant de pile. Cela pourrait donc amener un retard du signal sur le début réel du mouvement ; je m'en suis aperçu, bien des fois, dans les premières tentatives que j'ai faites pour étudier avec des appareils électriques la succession des mouvements du cœur.

(2) Voy. *la Machine animale*, p. 117.

étaient transmis par l'air et le retard de la transmission avait été égalisé par le soin qu'on avait pris d'employer, pour les quatre pieds, des tubes de transmission de même longueur. Pour signaler l'instant de son appui, chaque pied écrasait une petite boule de caoutchouc qui envoyait de l'air dans les tambours inscripteurs ; le levé du pied était suivi d'une rentrée de l'air dans la boule, ce qui produisait un nouveau signal.

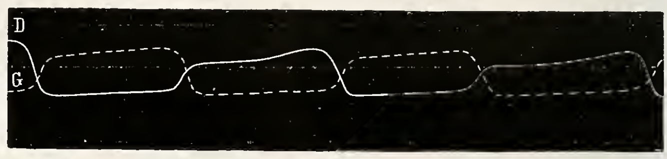


Fig. 81. — Marche de l'homme. — D, ligne pleine, signaux du pied droit ; les élévations de la ligne correspondent aux appuis du pied. — G, ligne ponctuée, tracé du pied gauche.

On obtenait ainsi deux sortes de tracés, appartenant au pied droit et au pied gauche, et dont les élévations et abaissements alternaient entre eux, comme les mouvements des pieds eux-mêmes.

J'ai cru donner à ces figures une forme plus saisissante en les transformant (fig. 82), en une sorte de notation musicale dans laquelle on aurait réduit la *portée* à deux lignes. Les appuis du pied droit s'inscrivent en blanc sur la ligne inférieure ; ceux du pied gauche portent des hachures obliques. Dans l'allure marchée M, les appuis des pieds se succèdent sans intervalle, ce qui exprime que le corps pose constamment sur le sol, soutenu, tantôt par un pied, tantôt par l'autre.



Fig. 82. — Ligne M, notation de la marche de l'homme. Les notations du pied droit sont en blanc ; celles du pied gauche portent des hachures obliques.— Ligne C, notation de la course ; les appuis alternatifs des deux pieds sont séparés par des instants de suspension du corps en l'air.

Les expériences sur la course ont donné des tracés dont la notation C (fig. 82), est différente de celle de la marche :

on y voit, qu'entre les appuis successifs des deux pieds, le corps reste un instant suspendu sans appui.

Enfin, en appliquant la même méthode expérimentale à la détermination des allures du cheval, on obtient une série de rhythmes (fig. 83), qui dérivent les uns des autres. Pour

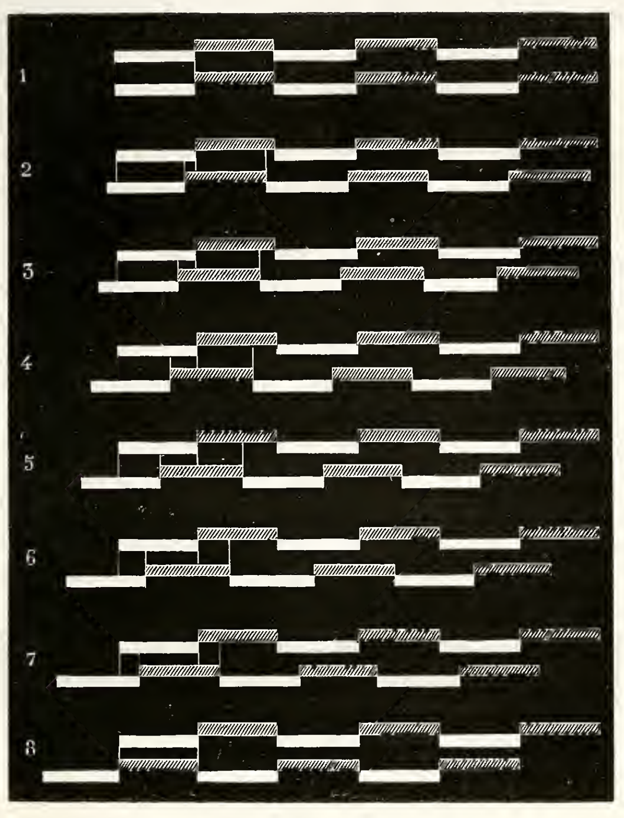


Fig. 83. — Notation des allures du cheval.

N° 1 Amble (tous les auteurs).
N° 2 { Amble rompu (MERCHE). Pas relevé (BOULEY).
N° 3 { Pas ordinaire du cheval d'allure (MAZURE). Amble rompu (BOULEY). Traquenard (LECOQ).
N° 4 Pas normal (LECOQ).
N° 5 Pas normal (BOULEY, VINCENT, GOIFFON, SOLEYSELL, COLIN, etc.)
N° 6 Pas normal (RAABE).
N° 7 Trot décousu.
N° 8 Trot ordinaire.

en comprendre la formation, il faut, avec Dugès, considérer un quadrupède comme formé de deux êtres bipèdes marchant l'un derrière l'autre. La notation des allures du cheval est

formée de quatre lignes groupées deux à deux. Les deux lignes supérieures correspondent à la notation des pieds de devant; les deux inférieures à celle des pieds de derrière.

Huit allures sont notées dans la figure 83; elles dérivent les unes des autres par une anticipation de plus en plus prononcée des mouvements des pieds postérieurs. Ainsi, le premier terme de la série est l'*amble*, allure dans laquelle le pied droit d'avant se meut en même temps que le pied droit d'arrière; il en est de même du pied gauche. Dans l'allure n° 2, *amble rompu*, les pieds d'arrière entrent en mouvement un instant avant les pieds antérieurs. L'allure n° 3 montre une anticipation encore plus grande des membres postérieurs, et ainsi de suite, jusqu'à la huitième allure, le *trot*, dans laquelle le pied postérieur a fini entièrement son appui quand le pied antérieur du même côté se pose sur le sol.

Je ne puis insister sur les détails des expériences que j'ai faites sur ce sujet, n'ayant pour but, en les rappelant ici, que de montrer une application de la méthode graphique à la détermination de mouvements successifs (1).

Ce tableau ne renferme que les allures marchées; celles dans lesquelles le corps ne quitte pas le sol; encore faudrait-il retrancher de cette série le trot franc, dans lequel le cheval quitte la terre pendant un instant.



Fig. 84. — Notation du galop à droite (à trois temps).

Quant aux allures sautées, leur notation montre que l'animal est suspendu pendant un certain temps au-dessus du sol; nous n'en donnerons qu'un type: la notation du galop à droite (2).

(1) Voir pour plus de détails : *la Machine animale*, p. 144

(2) Si j'avais à reprendre aujourd'hui des expériences de ce genre, je renoncerais à l'emploi des signaux à air, pour adopter les signaux électriques légers comme ceux de M. Marcel Deprès. De minces fils conducteurs s'aménageraient mieux le long des jambes de l'animal que les tubes de caoutchouc et il serait plus facile, je crois, d'adapter sous le sabot un appareil qui ferme et ouvre un courant électrique pendant les appuis et levés du pied que d'appliquer les appareils chargés de fournir les signaux à air. En outre, comme la

D) *Détermination de la fréquence et de la régularité d'actes successifs.* — On a vu comment Eytelwein a déterminé, le premier, la fréquence des coups d'un bélier hydraulique. La même méthode s'applique à toute espèce de phénomènes, et la précision qu'on peut atteindre dans ce genre de déterminations n'a pour ainsi dire point de limite. Tout dépend de l'approximation avec laquelle on évalue, en temps, la valeur des intervalles qui séparent les signaux enregistrés.

Pour revenir aux exemples précédents, supposons que chaque pas soit signalé sur un cylindre à rotation rapide, à côté du tracé d'un chronographe; la durée d'un pas se déduira du nombre des vibrations auxquelles il correspond. La fréquence des pas s'estimera d'après la durée de chacun.

On mesurera de la même manière le nombre des pulsations du cœur ou des mouvements respiratoires qui s'accomplissent en un temps donné. Cette estimation des fréquences pourra s'appliquer à des phénomènes extrêmement rapides. Ainsi, on mesure graphiquement le nombre des vibrations d'un diapason quelconque, en le munissant d'un style et en le faisant écrire à côté d'un chronographe ou d'un signal des secondes, ou bien à côté d'un autre diapason dont le nombre de vibrations soit connu.

J'ai déterminé graphiquement la fréquence des battements d'ailes de différents insectes, en faisant tracer leurs ailes à côté d'un diapason chronographe (1). Prenons (fig. 85), une ouverture de compas égale à 25 vibrations du chronographe, ce qui correspond à 1/10 de seconde, et portons cette ouverture sur le tracé des coups d'aile, nous voyons que 6 coups

notation est le but véritable de ces expériences, on pourrait l'obtenir directement avec la disposition suivante. Les styles des signaux électriques seraient disposés sur deux séries de lignes parallèles, comme celles qui constituent la *portée* dans la notation des allures. Chacun des styles, terminé par un style à large bec comme une plume rognée, tracerait les signaux en venant frotter sur le papier au moment de l'appui du pied, et en s'éloignant du papier à l'instant du levé. Enfin, la forme des styles donnerait des tracés différents pour le pied droit et pour le pied gauche. La notation d'une allure se trouverait ainsi tracée directement dans des conditions très-simples et plus précises encore que dans mes premières expériences.

(1) Voy. *la Machine animale*, p. 187.

d'aile y sont contenus, d'où il suit que l'aile de la guêpe battait 60 fois par seconde.

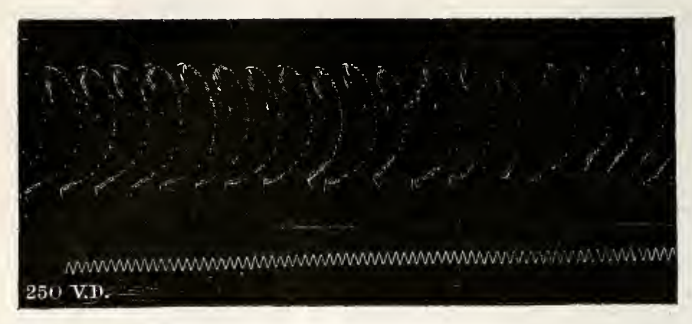


Fig 85. — Trace de l'aile d'une guêpe captive qui fait les mouvements du vol en frottant contre un cylindre enfumé. — Chronographe, 250 V. D. Fréquence des coups d'aile : 60 par seconde.

Il se fait, en ce moment, dans mon laboratoire, des expériences dans lesquelles s'inscrivent directement les vibrations du larynx, au moyen de signaux électriques. On peut évaluer, d'après les tracés, la tonalité de la note chantée et apprécier la justesse du son inscrit. Ces expériences seront décrites dans un prochain mémoire.



Fig. 86. — Vibrations du larynx, tonalités différentes.

La mesure des fréquences de certains actes permet d'obtenir indirectement des notions plus compliquées, telles que des mesures de changements de *volume* ou de *vitesse*.

Quand une glande sécrète, si l'on recueillait goutte à goutte le produit de sa sécrétion et si la chute de chaque goutte était pointée sur un cylindre, la fréquence plus ou moins grande de signaux exprimerait la rapidité de la sécrétion.

La figure 88 représente l'appareil fort simple qui inscrit ainsi la vitesse d'une sécrétion : soient deux tubes par les-

quels se déverse le liquide sécrété par les deux glandes dont on



Fig. 87. — Mouvements de l'aile d'un macroglosse : 50 par seconde.

veut comparer la fonction (rein, parotides) ; le liquide tombe

Fig. 88. — Compte-gouttes inscripteur pour estimer la rapidité des sécrétions.

goutte à goutte par les tubes ; l'un versant le produit de la

glande de droite, l'autre celui de la glande de gauche. Ces gouttes tombent sur des palettes qui terminent le levier de deux tambours explorateurs dont chacun est mis en communication, par un tube à air, avec un tambour à levier inscripteur qui trace sur le cylindre un signal pour chaque goutte qu'il a reçue.

On obtient ainsi des signaux (fig. 89), plus ou moins rapprochés les uns des autres suivant le nombre de gouttes qui tombent en un temps donné, c'est-à-dire suivant la rapidité de la sécrétion.

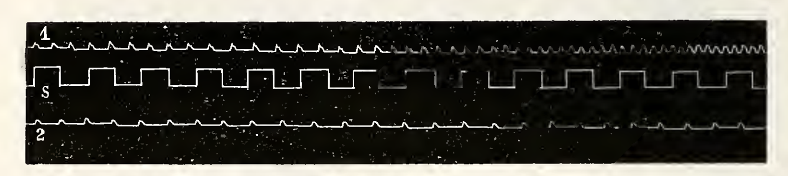


Fig. 89. — Tracés du compte-gouttes : ligne supérieure, liquide versé par le tube de droite; ligne inférieure, liquide versé par le tube de gauche. (Expérience faite sur deux conduits qui versaient de l'eau avec des débits variables.)

Enfin, quand une voiture roule, chacun de ses tours de roue correspond à un espace constant parcouru par le véhicule. Inscrire ces tours, en produisant par chacun d'eux un signal, c'est obtenir, d'après le nombre des signaux tracés en un temps donné, la mesure de la vitesse de la voiture.

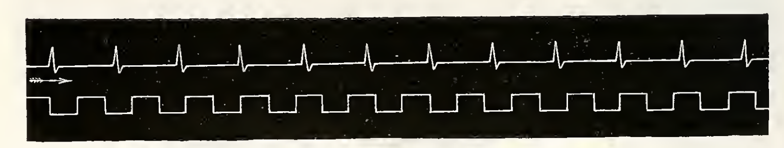


Fig. 90. — Ligne supérieure, comptage des tours d'une roue qui avait 3 m. 20 de circonférence. — Ligne inférieure, comptage des secondes (Voy. fig. 77). — Vitesse de la voiture, 2 m. 68 par seconde.

Soit (fig. 90) le tracé qui représente le comptage des tours de roue d'une voiture. Si nous connaissons le périmètre de la roue, nous savons combien de chemin a été parcouru en un temps donné, d'après le nombre de tours de roue qui sont signalés sur le papier pendant une durée que mesure le chronographe.

E) *De la régularité des phénomènes et de leur rhythme.* — La mesure des intervalles qui séparent une série de signaux fait connaître si le retour de chacun des phénomènes correspondants se fait ou non à intervalles réguliers. L'appréciation de nos sens, en pareille matière, est très-infidèle. Que de fois, en interrogeant le pouls d'un malade, n'ai-je pas cru à l'existence d'une régularité parfaite, tandis que l'irrégularité s'accusait aux appareils inscripteurs ? Pour estimer la régularité ou l'irrégularité des intervalles qui séparent une série de phénomènes, on mesure au moyen du chronographe l'intervalle qui sépare leurs signaux. Plus on veut obtenir de précision dans cette mesure, plus le cylindre doit tourner avec vitesse et plus aussi le chronographe doit donner des vibrations rapides.

Dans les phénomènes physiologiques, on n'a pas toujours besoin de mesures très-délicates. L'inscription du pouls, sur un papier qui chemine avec une vitesse d'un demi-centimètre par seconde, suffit pour signaler des irrégularités qui échappent au toucher. Ainsi, dans le tracé (fig. 91), il n'est pas besoin d'employer le chronographe pour constater l'irrégularité des intervalles qui séparent les pulsations. Tout le monde, à l'inspection de cette figure, verra qu'à certains instants 2 pulsations duraient plus longtemps que 3 pulsations à l'instant suivant.

L'imperfection n'est pas aussi grande pour tous nos sens que pour le tact ; l'oreille est habituellement plus exercée à la mesure des intervalles de temps, de sorte que, si l'on se servait des pulsations artérielles pour provoquer une série de bruits, l'irrégularité deviendrait beaucoup plus apparente. Mais aucun moyen ne peut suppléer à la chronographie, quand on veut obtenir des mesures tout à fait précises.

On estime de la même façon la régularité ou l'irrégularité des mouvements respiratoires, celle des mouvements de la locomotion de l'homme ou des animaux. Il n'y a rien de particulier à dire sur le mode d'expérience usité en pareil cas ; le lecteur a déjà vu comment on procède pour obtenir un signal à chacun des pas ; nous dirons, en temps et lieu, comment on inscrit les mouvements respiratoires.

La chronographie trouve ses applications les plus nom-

breuses dans le domaine de la physique ; il est à peine nécessaire d'insister sur ce point. Ces applications sont si nombreuses, qu'on ne saurait en faire qu'une énumération fort incomplète.

Ajoutons que la chronographie se contrôle elle-même, et qu'elle permet de savoir avec exactitude si le mouvement des appareils rotatifs employés est régulier ou ne l'est pas. Quand on inscrit sur le cylindre enfumé les vibrations d'un diapason quelconque, comme ces vibrations sont parfaitement isochrones, il doit y en avoir toujours le même nombre dans une même division du temps. D'où il suit que, si la marche du cylindre est régulière, un certain nombre de vibrations du diapason devra toujours occuper sur le papier une même longueur. Pour vérifier l'uniformité de la marche d'un régulateur, on devra donc procéder de la manière suivante :

On inscrit les vibrations d'un chronographe pendant deux ou plusieurs tours de cylindre ; (fig. 92) puis, quand le tracé est fixé, on compte, sur une des lignes tracées, 10 vibrations du chronographe ; on prend au compas l'intervalle qui sépare les sommets des deux vibrations extrêmes et l'on porte l'ouverture du compas sur une autre ligne du tracé. Si la marche du régulateur est parfaite, le compas devra, sur une ligne quelconque, toucher par ses deux pointes les sommets de deux vibrations entre lesquelles existera un intervalle de 10. Suivant la précision que l'on veut apporter dans ce contrôle de la régularité de marche des appareils, on mesurera des intervalles plus ou moins grands, dans lesquels, par conséquent, sera contenu un plus ou moins grand nombre de vibrations.

Dans les mouvements irréguliers, la mé-

Fig. 91. — Pouls irrégulier inscrit avec le sphygmographe à transmission (Héliogravure).

thode graphique permet de saisir un élément fort important, je veux parler du *rhythme* que les irrégularités affectent dans certains cas. C'est là encore un point sur lequel nos sens nous renseignent fort mal. Pour peu que la période qui règle les retours d'un même rhythme soit longue et compliquée, elle nous échappe. Le souvenir fugitif des intervalles qu'on a observés s'efface, et nous ne reconnaissons plus le retour d'une même période, s'il vient à se reproduire.

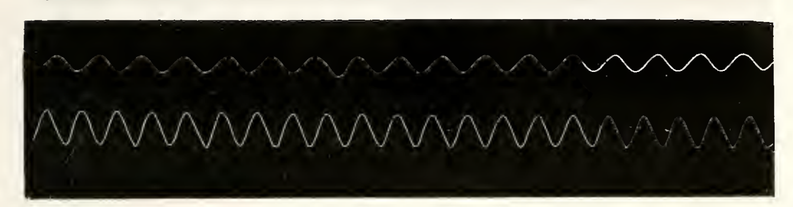


Fig. 92. — Tracés du chronographe de 100 vibrations doubles obtenues à deux tours différents du cylindre.

Mais les signaux placés sur le papier se représentent à nos yeux d'une façon précise ; la vue embrasse une assez grande étendue de tracé pour saisir le retour périodique de certaines irrégularités, et quand la périodicité est bien constatée, elle nous met sur la voie de nouvelles recherches relativement à la cause qui l'a produite. Ainsi, en se reportant à la figure 93, on voit que la période qui ramène un même type de pulsation correspond à dix battements du cœur. Tout le monde sait que les battements du cœur d'un chien sont irréguliers ; sait-on aussi bien que cette irrégularité est périodique ? La méthode graphique fait saisir, au premier coup d'œil, cette périodicité ; elle nous montre en outre que le retour de chaque période est lié à certaines phases de la respiration.

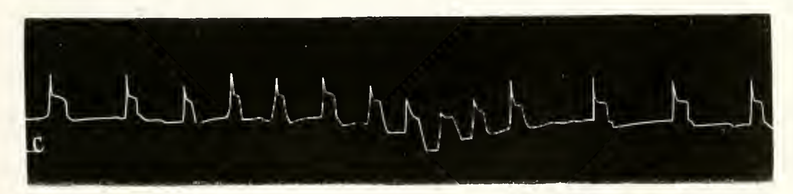


Fig. 93. — Pulsation du cœur du chien ; irrégularités périodiques.

Dans certains états séniles, le pouls présente une irrégula-

rité périodique encore plus prononcée, les figures 94 et 95 en fournissent des types très-accusés. Il m'a semblé que dans la plupart des cas, c'est encore à des influences respiratoires que tenaient ces différentes périodes (1).

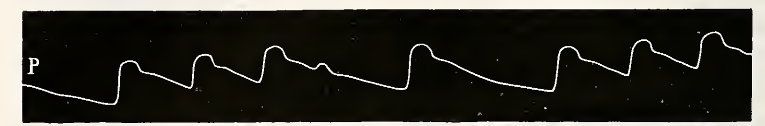


Fig. 94. — Pouls sénile irrégulier périodique.

Dans les phénomènes qui se modifient d'une manière lente, la périodicité est moins apparente encore, car l'observation devrait, pour la saisir, être prolongée pendant un temps très-



Fig. 95. — Pouls sénile irrégulier périodique (redoublé).

long. Des variations liées aux périodes diurnes ou annuelles risquent de nous échapper, plus encore que celles dont le retour est fréquent. C'est là un ordre de phénomènes dans lesquels la méthode graphique est appelée à rendre de très-grands services.

(1) Nous n'avons à considérer, dans chaque pulsation, que le moment où elle apparaît ; la courbe inscrite par le sphygmographe n'est présentée maintenant qu'à titre de signal du pouls. Plus tard nous étudierons la forme de ces pulsations et les influences qui la modifient.

(A suivre.)

V

RECHERCHES SUR L'ANATOMIE ET LA PHYSIOLOGIE DES NERFS VASCULAIRES DE LA TÊTE.

Par le Dr FRANÇOIS-FRANCK.

> A l'origine des nerfs crâniens, on trouve des branches qui doivent être considérées comme branches d'origine du grand sympathique.
>
> Cl. Bernard. *Syst. nerv.*, II, p. 9.

INTRODUCTION.

Dans ce travail, je me suis proposé de rapprocher l'innervation vasculaire de la tête de l'innervation vasculaire des membres, cette dernière, mieux connue, servant de point de départ.

J'ai cherché à grouper les documents les plus probants en faveur de cette proposition que la règle est la même pour les vaisseaux de la tête et pour les vaisseaux des membres, les uns et les autres étant innervés par des filets provenant de la chaîne ganglionnaire et par des nerfs cérébro-rachidiens, qui se distribuent avec eux dans une région donnée. La seule différence m'a semblé consister en ce que, les nerfs crâniens représentant des nerfs rachidiens dissociés, les filets vasculaires qu'ils fournissent sont aussi plus divisés et plus nombreux ; mais on verra que, malgré cette complication dans le détail, il est toujours possible de ramener la provenance des

nerfs vasculaires de la tête, comme celle des nerfs vasculaires des membres, à deux sources : le sympathique libre (ganglions ou plexus), et les filets contenus dans les nerfs moteurs et sensitifs, réunis dans les membres, dissociés à la tête.

Il m'a paru prudent de ne point aborder la question du trajet des éléments sympathiques dans les centres nerveux cérébro-rachidiens : les recherches histologiques ne nous ont encore rien appris de précis sur ce point.

Pour la partie de l'histoire du sympathique à laquelle j'ai consacré cette étude, je me suis appuyé, autant que possible, sur la notion anatomique fournie par la dissection, et n'ayant pas à produire des recherches qui me fussent propres dans une œuvre aussi impersonnelle que celle-ci, j'ai porté une attention particulière aux renseignements bibliographiques indiquant les sources auxquelles j'ai le plus souvent puisé moi-même.

Si j'ai pu me borner à l'anatomie descriptive presque seule, pour les nerfs vasculaires de la face par exemple, je me suis vu obligé, dans l'étude des filets du même ordre plus profondément situés, de mettre souvent l'anatomie au second plan, et la raison en est simple : il s'agit de discerner, pour ces régions profondes, la provenance des filets qui, d'un ganglion, se rendent sur des vaisseaux ; la continuité anatomique est interrompue par le ganglion à travers lequel le scalpel est impuissant à suivre les éléments nerveux. Alors, les expériences portant sur tel ou tel nerf afférent, avec les modifications vasculaires périphériques qui les suivent, avec les dégénérescences révélées par l'histologie, quelquefois la clinique, souvent l'anatomie comparée, ces diverses sources ont dû être mises à contribution.

Mais, quand j'y ai puisé les renseignements que l'anatomie toute seule ne me fournissait pas, j'ai nécessairement abordé des questions litigieuses, cherchant au milieu d'expériences contradictoires, d'assertions opposées, de faits cliniques complexes, de quel côté se trouvait la plus grande somme de probabilités.

C'était une tâche toujours ingrate, fort délicate parfois ; mais la peine que j'ai pu prendre pour rassembler mes matériaux d'étude sera suffisamment compensée si je suis arrivé à relier entre eux des faits utiles à connaître, quelque minime que soit mon apport à l'anatomie et à la physiologie de l'innervation vasculaire. Les maîtres dont je commente les opinions ne sauraient voir dans la discussion de leurs travaux d'autre but que la recherche d'une vérité souvent bien difficile à rencontrer.

J'ai dit dans quel esprit ce travail était conçu ; je n'ai plus qu'à ajouter qu'il m'a été inspiré par mon excellent maître, le professeur Marey, auquel j'ai donné un bien faible témoignage de ma reconnaissance en lui dédiant ma première œuvre.

Voici quel sera le plan de ce travail :

1re PARTIE. — Étude sommaire de l'innervation vasculaire, dans les régions où se distribuent les nerfs rachidiens.

2e PARTIE. — Étude plus détaillée des nerfs vasculaires pour les différentes régions de la face et du crâne ; revue des principaux points de physiologie qui s'y rapportent.

3e PARTIE. — Essai de rapprochement entre les nerfs vasculaires rachidiens et les nerfs vasculaires crâniens, fondé sur la division vertébrale du crâne, sur l'assimilation des nerfs crâniens aux paires rachidiennes ; enfin sur quelques considérations d'embryologie et d'anatomie comparée.

PREMIÈRE PARTIE.

I. — Distribution générale des nerfs vasculaires.

Le système nerveux ganglionnaire fournit aux artères un grand nombre de branches anastomosées sous forme de plexus; mais ces vaisseaux en reçoivent aussi qui viennent du système cérébro spinal (1).

(1) L'une des premières indications sur cette double provenance a été donnée par Wrisberg, *De Nervis arterias venasque comitantibus*, Gœttingue, 1784. —

Pour leur trajet dans la paroi vasculaire, *voir* Pappenheim *Die Specielle Gewebelhere der Gehörorrganes*, Breslau, 1840

Burggræve, *Histologie*, 1843,
Schlemm, *Encyclop. Wörterbuch*, } disposition de ces nerfs dans la tunique moyenne des artères.

Henle, *Anat. générale*, t. II,
Kölliker, *Traité d'histologie*, } nerfs sur les artères de la pie-mère *jusqu'à* 0m,009.

Mikroskop. anatomie, t. II. — Terminaison par des extrémités libres constatée sur les artères des batraciens ; elle n'a point été retrouvée sur celles des mammifères.

Weir Mittchell. (Lésions des nerfs). — Appareil ganglionnaire des parois artérielles.

Recherches plus récentes :

Robin, Ordònez, Humberg. (Fibres de Remak terminées en pointe au milieu des fibres lisses).

Arnold (1869). (Extrémité renflée au milieu des fibres elles-mêmes).

Frankenhauser (1867). (Filets terminés dans le nucléole).

Beale et Klebs (1867). (Terminaison en réseaux avec renflements en certains points).

Hénocque (1870). (Trois variétés de terminaison dans les nucléoles, dans un point quelconque de la fibre, en dehors d'elle.

Engelman et Frey. (Avouent l'inanité de leurs efforts).

Legros. (Les artères à couche musculaire mince paraissent plus riches en fibres nerveuses que les grosses artères à couche moyenne épaisse.)

Les nerfs de ces deux catégories se confondent à la surface et dans l'épaisseur des parois vasculaires ; c'est eux que l'on décrit depuis Stilling, sous le nom de vaso-moteurs, terme assez explicite pour indiquer leur rôle général, assez vague cependant pour ne point préciser dans quel sens les uns et les autres peuvent agir. Jusqu'à l'époque récente où la dilatation vasculaire active s'est introduite en physiologie, vasomoteur est resté synonyme de vaso-constricteur ; aujourd'hui que certains nerfs ont été reconnus comme déterminant la dilatation vasculaire, le terme est encore excellent, car il peut s'appliquer aux nerfs vaso-dilatateurs ; ceci dit sans préjuger en rien du mode d'action de ces derniers, ni de la distinction fonctionnelle, admise par quelques-uns, entre les filets ganglionnaires et les filets cérébro-rachidiens.

J'ai préféré cependant le qualificatif *vasculaire* qui indique seulement la destination de ces nerfs, sans impliquer la notion physiologique.

La dissection la plus fine, celle qu'on fait sous l'eau, avec une aiguille, ne permet d'établir aucune différence entre les deux ordres de filets vasculaires : on arrive, par ce procédé, à des réseaux enchevêtrés dans lesquels apparaissent de petits renflements probablement ganglionnaires ; mais il est impossible de distinguer les filets sympathiques proprement dits, des filets cérébro-rachidiens ; d'y suivre, au delà des réseaux, les nerfs qu'on a conduits avec le scalpel jusqu'à la paroi même du vaisseau.

L'histologie n'a point distingué ces nerfs les uns des autres ; elle nous a appris seulement (et c'est déjà beaucoup, comme on le verra quand je rappellerai les théories vaso-dilatatrices), que les filets vasculaires, anastomosés entre eux, aboutissaient les uns et les autres à des amas cellulaires, au delà desquels nous ne connaissons rien de précis sur leur mode de terminaison par rapport aux éléments musculaires des vaisseaux. Il y aurait donc, dans l'épaisseur des vaisseaux contractiles, des plexus ganglionnaires, comme ceux d'Auerbach et de Meissner dans la paroi intestinale, et la physiologie a tiré parti de ces notions anatomiques pour expliquer, au moins d'une manière provisoire, l'influence suspensive des vaso-dilatateurs sur les vaso-constricteurs.

Ces détails sur les nerfs des vaisseaux ne sont pas exclusivement applicables aux artères de petit calibre : les veines, sans être aussi bien fournies que les artères, n'en ont pas moins un appareil musculaire (1) mis en jeu par les mêmes nerfs qui président à la contractilité artérielle. Je ne parle point des veines caves (2), mais des veinules, jusqu'à un certain calibre. Les mêmes influences qui excitent la contractilité artérielle déterminent le resserrement des veines, et, depuis plus d'un siècle, le fait a été maintes fois observé (3). Il nous faudra donc tenir compte de l'influence simultanée des nerfs vasculaires sur les artérioles et les veinules, quand, dans une région comme la face, nous verrons les mêmes nerfs se jeter sur ces deux ordres de vaisseaux.

Je devais rappeler ces généralités, mais je ne saurais m'y étendre plus longuement, ayant pour principal objet, dans cette première section, l'étude du trajet des nerfs vasculaires et de leurs rapports avec les nerfs voisins.

Avant d'aborder à ce point de vue les nerfs vasculaires de la tête, il me paraît indispensable de bien établir ce que nous savons des nerfs vasculaires des membres et de la part que prennent à cette innervation les troncs mixtes rachidiens.

(1) *Recherches histologiques sur la structure des veines:*

Salter, *Veins. Todd's cyclop. of anat. and phys.*, t. IV.

Henle, *Loc. cit.*

Kölliker, *Beitrage zur Keutniss. . Zeitschrifft fur Wissenschafft, Zool.*, 1849, t. I.

(2) Historique complet des contractions des veines caves, dans Milne-Edwards, *Anat. et Physiol. comparées*, t. IV. p. 305. — Note.

(3) Expériences démontrant la contractilité des veines. — Irritation par le scapel. par les acides, par l'électricité, par le choc :

Verschuir, *Dissertatio de arteriarum venarumque vi irritabili*, 1756.

Marx, *Diatribe anat. phys. de structura atque vita venarum*, 1819

Hastings, *On the inflamm. of the mucous membr. of the Lungs.*

Kölliker, *Loc. cit.*, etc., 1849 :

Nysten, *Rech. de chimie et de phys. pathol.*

Gubler, *Comptes rendus, Soc. Biol.* :

Wharton Jones. *Discovery,.. Rhythmical contractility. — Philosoph. transact.* 1852.

Vulpian. *De la contractilité des vaisseaux de l'oreille du lapin, compt. rend. Soc. Biol.*, 1856.

II. — Nerfs vasculaires rachidiens.

Les notions relatives aux nerfs vasculaires rachidiens sont résumées dans les deux propositions suivantes :

1° Les racines des nerfs rachidiens contiennent les tubes nerveux qui, plus loin, se séparent en partie du tronc mixte, pour constituer le rameau communicant, et en partie continuent leur trajet dans le nerf qui les emporte à la périphérie ; mais le tronc mixte en reçoit aussi du ganglion.

2° Les filets qui se sont détachés du nerf mixte. pour

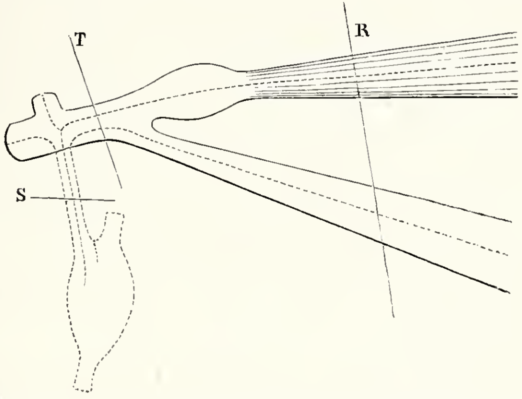


Fig. 96. — Schéma d'un nerf mixte rachidien avec rameau communicant. — Pointillé indiquant la présence de fibres sympathiques. — S. Section du rameau communicant. — T. Section du tronc mixte. — R. Section des racines.

constituer le rameau communicant, ne se rendent pas tout de suite à destination et suivent, quelquefois longtemps, le cordon sympathique, avant de se jeter dans les plexus vasculaires auxquels ils sont affectés. J'emprunte au professeur Vulpian (1) un grand nombre des indications que j'utilise dans cet exposé.

(1) *Syst. nerv.*, 1866, et *Leç. sur vaso-moteurs*, 1874.

Ire Proposition.

a) Les racines des nerfs rachidiens contiennent les éléments des rameaux communicants.

Cette proposition est aujourd'hui démontrée par la méthode wallérienne : Schiff (1), Courvoisier (2), Giannuzzi (3), ont sectionné : 1° le rameau communicant S (fig. 96) ; 2° le tronc mixte rachidien T, entre le point de réunion des deux racines et le point d'émergence du rameau communicant ; 3° les deux racines rachidiennes R. — A la suite de ces différentes sections, ils ont toujours constaté la dégénérescence du bout périphérique du rameau communicant.

Ces résultats ont été confirmés, une fois de plus, par le professeur Vulpian, et sont considérés par lui comme incontestables : il faut en effet que le doute ne soit plus permis à ce sujet, car M. Vulpian (Leç. de 1866) considérait comme absolument démonstratives les expériences de Waller qui avaient fourni des résultats opposés, et aujourd'hui il croit « probable qu'une cause d'erreur s'est introduite dans les expériences de Waller et l'a conduit à des conclusions inexactes » (4). — Ce rapprochement a pour moi une grande valeur et suffit à lever les hésitations que j'aurais pu conserver s'il m'avait fallu trancher la question moi-même, en comparant ces divers résultats expérimentaux.

b) Les fibres des rameaux communicants suivent surtout les racines antérieures.

Le professeur Vulpian l'a constaté dans les recherches citées plus haut, et déjà en 1866 (5) le même physiologiste notait le fait chez les mammifères et mieux encore sur les grenouilles.

J'ajouterai, comme preuve physiologique, l'expérience de Pflüger (6) qui, galvanisant les racines antérieures des nerfs

(1) Schiff, *Vierordt's Archiv.*, XI.
(2) Courvoisier, *Beobachtungen über den symp.*, — *In Max Schultze*, 1866.
(3) Giannuzzi, *Dei rapporti esistenti fra il midolla spinale... col methodo Walleriano* (*Ricerche eseguite nel Gabin. di Filiol. d. R. Univ. di Siena*, 1871-1872 ; Siena-Roma, 1872.
(4) Vulpian. *Leç. Vaso-mot.*. 1874, p. 188.
(5) — *Phys. syst. nerv.*, p. 725.
(6) Pflüger, *Allgem. med. Centralzeitung*, 1855.
— et *Canstatt's Jaresb.*, 1855, t. Ier.

sciatiques de la grenouille, a pu déterminer la contraction des vaisseaux de la patte, au point d'y arrêter complétement la circulation.

Inversement, quand on coupe, sur un lapin ou un chien, les racines qui, plus bas, prendront part à la formation du sciatique, on note un certain degré d'échauffement du membre correspondant (1).

c) Le passage des rameaux communicants par les racines antérieures n'exclut pas le passage par les racines postérieures.

Or, il me semble très-possible d'assimiler, au point de vue fonctionnel, les fibres sympathiques qui suivent les racines postérieures à ces racines elles-mêmes, et de les considérer, elles aussi, comme centripètes, partant du ganglion de la chaîne sympathique pour se porter aux régions postérieures de la moelle.

Cette interprétation me paraît rendre compte du fait suivant observé par Waller (2) : il avait sectionné les nerfs rachidiens de la grenouille à leur sortie du canal vertébral, et, notant la conservation des branches communicantes au milieu des fibres altérées des nerfs rachidiens, il se vit engagé à conclure que les tubes respectés par la dégénérescence avaient leur centre, non dans la moelle, mais dans le ganglion dont la section les avait séparés. Waller alla évidemment trop loin dans ses conclusions, et on lui a fait assez souvent le reproche de s'être fondé uniquement sur ces expériences pour admettre l'indépendance du grand sympathique ; mais il n'a pu être abusé au point de trouver normaux des tubes nerveux en voie de dégénérescence. Ce que je croirais plus volontiers, c'est qu'il a conclu de la partie au tout, et qu'en effet un certain nombre de fibres communicantes avaient conservé leur structure normale, celles précisément qui sont centripètes, et jouent dans le système ganglionnaire le rôle de conducteurs sensitifs, celles enfin qui, plus loin, vont se jeter dans les racines postérieures.

Les conducteurs centripètes existent bien, en effet, dans le sympathique et si, à l'état normal, nous n'avons pas conscience de leur fonctionnement, chacun sait ce qu'il y a des im-

(1) Schiff, *Untersuch...*, 2e partie, 1855.

(2) Waller, *Extr. de l'Institut*, nº 955. — *in Ann. sc. natur.*, 3e série, vol. XVI, 1851.

pressions viscérales, sous l'influence des troubles pathologiques ; en outre, il est évident que certains réflexes ont leur point de départ dans les viscères : la dilatation pupillaire, par exemple, à la suite d'irritations intestinales ; les troubles rétiniens dans le même cas (amaurose abdominale des Allemands). Un grand nombre de paraplégies paraissent également avoir leur source dans des désordres viscéraux, (sans que pour cela on soit forcé de les comprendre comme l'a enseigné Brown-Séquard). Peut-être enfin les vaisseaux eux-mêmes sont-ils le point de départ de filets centripètes chargés de régler, par action réflexe, la pression sanguine, et d'équilibrer, par des contractions ou des dilatations vasculaires, la circulation périphérique.

L'existence de conducteurs centripètes dans le sympathique est surtout démontrée par les expériences de Cl. Bernard et de Chauveau.

Cl. Bernard, ayant coupé le cordon de communication du premier ganglion thoracique avec le second, détermina des mouvements de l'intestin en excitant le premier. On ne peut douter ici d'une incitation centripète réfléchie par le centre médullaire sur l'appareil intestinal.

Chauveau (1), complétant les expériences de Budge et de Waller sur le centre cilio-spinal, excita les faisceaux postérieurs de la moëlle, et ensuite les racines postérieures seules. Il vit se produire les mêmes phénomènes pupillaires que quand il excitait le cordon sympathique cervical, ou les régions antéro-latérales du segment de moelle indiqué, et en conclut, à juste titre, qu'il s'agit d'un réflexe des racines postérieures sur les racines antérieures. Cette expérience, nette comme tout ce que fait Chauveau, me semble pouvoir être rapprochée du fait clinique indiqué tout à l'heure : de la dilatation pupillaire par irritation intestinale. Ce rapport fournit peut-être un nouvel argument en faveur de l'opinion que j'ai émise au début de cette digression : à savoir que les fibres des rameaux communicants qui suivent les racines postérieures peuvent être considérées comme des conducteurs sympathiques centripètes.

(1) Chauveau. Etude sur le centre cilio-spinal, *In Journ. de Phys.*, de Brown-Séquart, 1861.

d) Les troncs mixtes rachidiens contiennent des nerfs vasculaires qui se distribuent avec eux à la périphérie.

En effet, tous les filets empruntés à la moelle par les racines ne passent pas dans le rameau communicant ; il en est un certain nombre qui continuent leur trajet avec le nerf mixte, et le ganglion lui-même en fournit qui remontent vers le nerf pour suivre la même route.

Bidder et Volkmann (cités par Vulpian) ont constaté, sur la grenouille, qu'un grand nombre de ces filets se dirigent dans l'épaisseur du nerf rachidien, de dedans en dehors, et se portent avec lui à la périphérie.

Vulpian (1) a confirmé l'exactitude de cette donnée, aussi bien chez la grenouille que chez le surmulot.

IIe Proposition.

Les filets qui se sont détachés du nerf mixte, pour constituer le rameau communicant, ne se rendent pas tout de suite à destination, mais suivent quelquefois longtemps le cordon sympathique avant de se jeter dans les plexus vasculaires auxquels ils sont affectés.

Cette proposition mérite qu'on s'y arrête un instant, car elle rend compte des résultats variés obtenus à la suite de sections des racines, des troncs nerveux mixtes, du cordon sympathique et de la moelle elle-même, à des hauteurs différentes.

Ainsi, on coupe d'abord les racines du sciatique, puis le tronc du nerf au delà du plexus sacré. Après la section des racines, on constate, comme je l'ai déjà mentionné, un certain degré d'échauffement du membre, car on vient de sectionner les fibres vaso-motrices passant de la moelle dans le nerf ; quand ensuite on coupe le tronc du nerf lui-même à la cuisse, la température augmente très-notablement dans le membre, parce qu'on a supprimé l'influence des anastomoses du cordon sympathique avec le plexus sacré ; on aura un degré de température plus élevé encore, si, à ces deux sections, on ajoute celle du cordon sympathique lui-même, car on supprimera ainsi les nerfs qui se rendent directement du cordon aux vaisseaux du membre.

Or, ces éléments, contenus dans le cordon sympathique et

(1) Vulpian, *Leçons de* 1866.

apportés soit au plexus sacré, soit aux vaisseaux du membre inférieur, proviennent de bien haut dans la moelle. Schiff (1) fait remarquer que, plus une section de la moelle est élevée, plus la température s'élève dans les membres postérieurs ; en effet, on annihile une quantité de plus en plus grande d'éléments nerveux vasculaires, et la dilatation étendue qui en résulte s'accompagne, non point d'élévation absolue de la température dans la région où se distribuent les vaisseaux paralysés, mais, comme le dit souvent mon maître le professeur Marey, de nivellement de la température au profit de ces régions. J'ai pu observer au mois de mars de cette année, pendant un voyage à Bordeaux (2), une luxation de la sixième vertèbre cervicale avec broiement complet de la moelle à ce niveau. L'analyse de ce cas a surtout été faite au point de vue des troubles circulatoires périphériques et trouvera sa place ailleurs, mais je puis signaler ce fait : que le malade avait une température axillaire des plus élevées ; (le chiffre de 42° noté dans les deux aisselles m'avait semblé d'abord exagéré et pouvant être dû à un déplacement du zéro, mais le Dr Brouardel m'a dit depuis avoir observé une température beaucoup plus élevée encore dans les mêmes conditions, ce qui impliquerait une production centrale de chaleur exagérée. L'examen de mon malade eut lieu peu d'heures après l'accident, sans lésion inflammatoire des méninges, comme l'a démontré la nécropsie.

Ce cas rentre tout à fait dans la catégorie des expériences de Schiff et autres physiologistes, où les sections de la moelle se sont rapidement accompagnées d'une température périphérique élevée. La physiologie expérimentale emploie souvent ce moyen pour mettre un lapin, par exemple, dans les conditions d'un animal à sang froid, pour le refroidir au centre, en diminuant au profit de la surface la température centrale.

Marey a insisté depuis longtemps sur cette question du nivellement de la température quand une région superficielle est le siége d'une activité circulatoire exagérée, et a exprimé le regret de ne point voir recueillir dans tous les cas des mesures comparatives des températures centrale et superficielle,

(1) Schiff, *Untersuchungen*, 8e conclusion du mémoire, IIe partie, 1855.

(2) Dans le service du Dr Dudon, professeur suppléant à l'Ecole de médecine.

les seules, évidemment, qui puissent fournir d'utiles renseignements.

Cette indication de la distance considérable à laquelle s'étend l'influence du centre médullaire sur la circulation périphérique est ici formulée d'une manière trop générale; il me paraît important de chercher à la mieux préciser. Les notions recueillies dans divers travaux, notamment dans ceux de Schiff, de Pflüger et de Cyon, peuvent être utilisées à ce point de vue. J'ai essayé de les réunir sous forme de dessins schématiques représentant les nerfs vasculaires des membres.

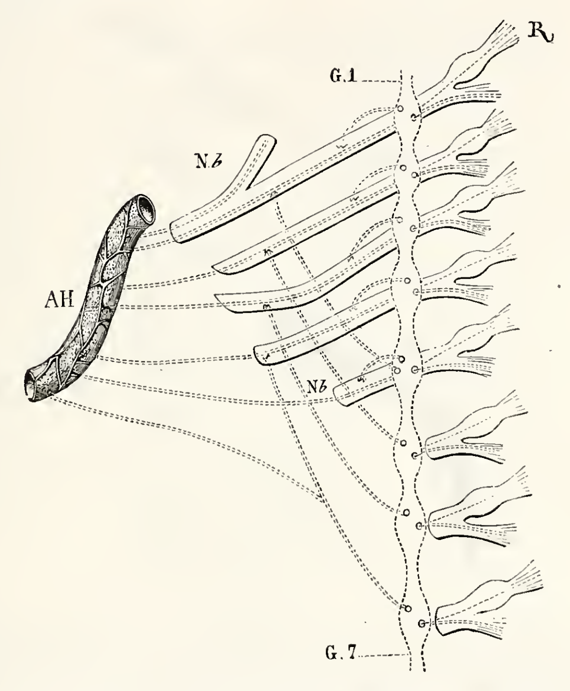


Fig 97. — Schéma des nerfs vasculaires du membre supérieur. — R, racines rachidiennes (cervico-dorsales). — Nb, Nb, nerfs mixtes formant le plexus brachial. — G1 à G7, ganglions du cordon sympathique (du 1er thoracique au 7e), recevant des racines R des filets sympathiques et en fournissant aux nerfs mixtes (rameaux communicants). — AH, artères du membre supérieur avec filets vasculaires provenant : 1° du cordon sympathique, 2° des nerfs mixtes rachidiens.

Ces figures ne peuvent que présenter les deux limites extrêmes entre lesquelles est comprise la région centrale fournissant les nerfs vasculaires des membres. Nous ne savons

pas, par exemple, jusqu'à quel niveau exact descendent les filets sympathiques du dernier ganglion dorsal, s'ils s'arrêtent au crural ou s'ils vont jusqu'au sciatique. Nous ne savons pas davantage si les filets remontant du septième dorsal au plexus brachial se jettent plutôt dans le tronc radial que dans le tronc cubital ; en d'autres termes, nous ne sommes pas en mesure de dire : la section de telle portion du cordon sympathique, thoracique ou abdominal, interrompt l'influence nerveuse de telle partie de la moelle.

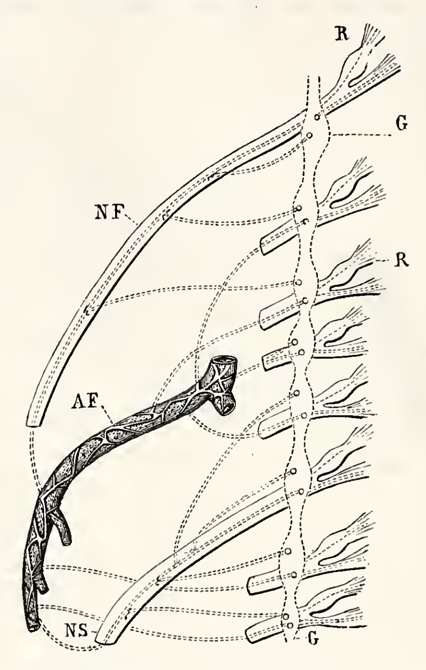


Fig. 98. — Schéma des nerfs vasculaires du membre inférieur. — R. Racines rachidiennes (lombo-sacrées). — NF. Nerf fémoral.— NS. Nerf sciatique. — GG. Ganglions du cordon lombo-sacré recevant des filets des racines R et en fournissant aux nerfs mixtes. — A. F. Artères du membre inférieur avec filets vasculaires provenant : 1° du cordon sympathique ; 2° des nerfs mixtes rachidiens.

Ce désideratum se retrouvera certainement quand nous étudierons la provenance des nerfs vasculaires de la tête ; mais, cette fois cependant, nous aurons à tenir compte des beaux résultats expérimentaux des Cl. Bernard, Budge, Waller, Chauveau, sur les filets émanant de la région ciliospinale.

J'insiste sur cette complexité du cordon sympathique dans les régions où il semble le plus simple, où ses ganglions et ses rameaux communicants se succèdent avec tant de régularité apparente. J'aurai en effet à revenir sur cet exemple, quand j'aborderai la question des communications des nerfs crâniens avec le sympathique, et plus d'une fois je me reporterai aux faits que je viens d'esquisser.

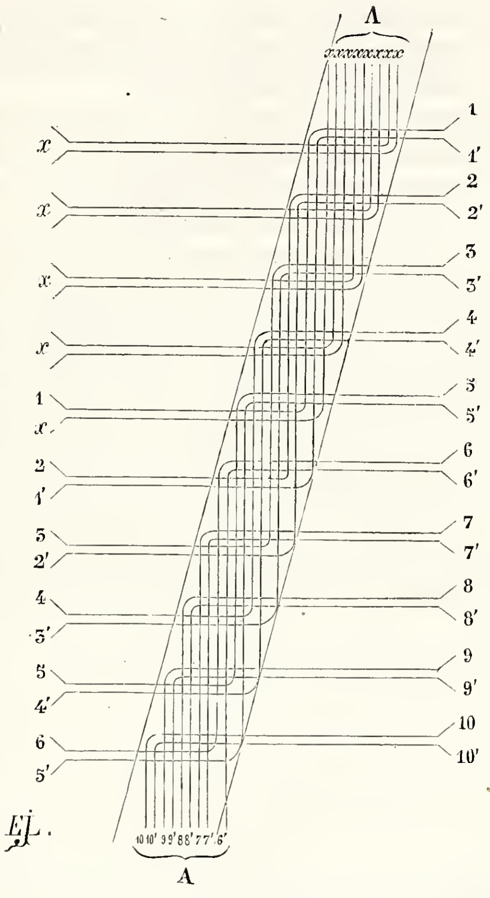


Fig. 99. — Schéma de la composition du cordon sympathique d'après Valentin.

Pour en terminer avec la constitution de ce cordon, je crois devoir réparer une omission qui m'a frappé dans les travaux que j'ai pu consulter sur ce sujet : Valentin a écrit en 1843

des pages remarquables sur les lois de radiation prochaine et éloignée du grand sympathique. Je n'ai vu nulle part qu'il fût fait mention de ses idées sur la constitution du sympathique ; cependant Valentin les a développées dans un livre répandu, *l'Encyclopédie anatomique*, et, comme on peut s'en assurer par le dessin ci-joint, elles sont absolument confirmées par les expériences plus récentes de Schiff, de Pflüger, de Cyon.

J'ai reproduit (fig. 99) le schéma linéaire de Valentin destiné à montrer la complexité du cordon sympathique, et le parcours des fibres primitives dans ce cordon.

« Cette figure, dit Valentin (1), représente idéalement la radiation éloignée, aussi simple que possible et uniforme partout... On suppose que les fibres primitives des racines 1, 2, 3, 4, 5, etc., s'épanouissent, à quatre distances pour les postérieures, à cinq distances vertébrales plus bas pour les antérieures. Il se produit ainsi un cordon longitudinal AA qui, on le voit sans peine, n'est pas un organe simple et n'a que l'apparence de la simplicité, puisqu'il résulte d'éléments successivement dépendant des fibres primitives des divers nerfs rachidiens... Il résulte de ce rapport, que le caractère essentiel du grand sympathique (thoracique ou abdominal) consiste en ce que ses ramifications s'épanouissent plus en arrière ou en bas chez l'homme que les nerfs rachidiens d'où elles émanent, quoique la distance puisse, d'ailleurs, être plus ou moins considérable. Cette loi est appelée loi de progression. »

(1) Valentin, *Névrologie*, trad. Jourdan, 1843, p. 57 et 58.

DEUXIÈME PARTIE.

NERFS VASCULAIRES DE LA TÊTE.

I) — Nerfs de la face.

Division. — La face, circonscrite en haut par la région frontale, en bas par la région sus-hyoïdienne dont la sépare la courbe du maxillaire inférieur, sur les côtés et en arrière par les régions temporale et auriculaire, offre à l'étude : 1° une vaste région superficielle dans laquelle sont incluses des délimitations secondaires (sourcillière, palpébrale, zygomatique, nasale, labiale, mentonnière, etc.) ; 2° une série de cavités (orbitaire, nasale, buccale).

La circulation des couches superficielles et celle des régions profondes sont étroitement liées l'une à l'autre, soit par l'origine commune, soit par l'union anastomotique des vaisseaux. Les nerfs qui se distribuent à ces vaisseaux sont fournis aussi bien à la surface que dans la profondeur, par les mêmes sources (sympathique, facial, trijumeau) ; mais toute physiologique que puisse être une étude d'ensemble montrant les variations circulatoires communes de parties aussi nombreuses, elle est impossible à présenter dès l'abord.

Quand j'aurai successivement passé en revue chacune des parties constituantes, et donné les détails anatomiques principaux qui ont trait à l'innervation des vaisseaux, alors seulement je pourrai essayer de grouper les faits et de rapprocher les unes des autres ces circulations que la nécessité de l'analyse m'aura forcé d'étudier isolément ; de même que plus tard, après avoir exposé dans des chapitres séparés l'inner-

vation des vaisseaux du crâne (régions superficielles et profondes), j'aurai à rechercher l'union qui existe entre les modifications circulatoires intra et extra-crânienne, cérébrale et oculaire, encéphalique et faciale, etc.

J'ai donc à étudier les régions de la face dans l'ordre suivant :

A) Régions superficielles ;

B) Régions profondes comprenant : les fosses nasales, la cavité orbitaire, la cavité buccale et annexes.

A) — Régions superficielles de la face.

Les nombreuses artères qu'on y rencontre sont fournies par la faciale, la temporale, l'ophthalmique.

Chacun de ces troncs emprunte des filets sympathiques aux plexus de la carotide externe (faciale et temporale), de la carotide interne (ophthalmique), et ces filets suivent toutes les branches artérielles, s'unissant chemin faisant à ceux qui viennent du facial et du trijumeau.

Les nerfs vasculaires sympathiques sont décrits en même temps que les vaisseaux sur lesquels ils reposent ; il n'y a donc pas lieu de leur consacrer une étude spéciale. Chaque fois qu'un nerf provenant d'une autre source sera indiqué comme abordant une artère, on sait qu'il se surajoute à l'élément constant, le sympathique libre, et vient compliquer l'innervation du vaisseau, que son influence soit du reste parallèle ou antagoniste, question que je ne dois point aborder ici.

C'est le facial qui a le rôle principal dans l'innervation des vaisseaux superficiels de la face ; il fournit, tant aux artères qu'aux veines, de riches réseaux « qui les accompagnent jusqu'à leurs ramifications les plus déliées » (1).

C'est donc ce nerf que j'ai eu surtout en vue dans la fig. suivante. Mais je ne dois point négliger la part que prennent à

(1) *Encyclopédie anatomique*, t. IV, p. 416.
Et Meckel, dans Ludwig, *Scriptores neurolog. min.*, t. II, tab. VI.

cette innervation les branches du trijumeau : l'artère temporale, à son origine; les artères frontale, nasale externe, sous-orbitaire, buccale, mentonnière sur leur trajet, en reçoivent de nombreuses ramifications : je les rapellerai, en leur lieu, pour éviter des répétitions trcp fréquentes.

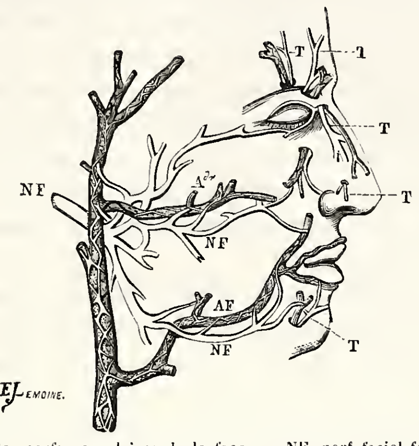


Fig. 100. — Schéma des nerfs vasculaires de la face. — NF, nerf facial fournissant des filets aux artères temporale, transversale de la face (A*dr*), faciale (AF), déjà couvertes de réseaux sympathiques venant du plexus de la carotide externe. A leur terminaison les branches du facial se jettent sur les artères frontale, nasale, sous-orbitaire, palpébrales, mentonnière, déjà innervées par les branches du trijumeau T.

a) Nerfs vasculaires de la joue.

On voit, dans la figure schématique ci jointe (fig. 100) et dans laquelle j'ai dû beaucoup sacrifier le détail à l'ensemble, le nerf facial F fournir, au niveau de la patte d'oie, des rameaux à l'artère temporale, ainsi qu'à sa branche collatérale, la transversale de la face; mais, comme l'indiquent les fig. 104 et 105, la temporale reçoit en outre des filets d'un plexus formé en grande partie par les branches d'origine du nerf auriculo-temporal. Ce plexus sera spécialement décrit à propos des nerfs de la parotide (V. *infra*). Il suit de là que les branches émanant de cette artère si abondamment fournie vont emporter, soit à la face, soit à l'oreille, soit à la région temporale, des filets de sources multiples : la transversale de la face entre autres en est couverte.

En outre, cette artère reçoit plus loin des filets qui lui sont propres. Le nerf palpébro-nasal inférieur anastomosé avec le

zygomatique inférieur, concourt, avec ce dernier, à entourer l'artère transversale de la face (1) et j'ajoute, toujours avec les mêmes auteurs : les rameaux supérieurs de ce nerf, de même que les rameaux les plus antérieurs, contribuent à l'enveloppement (*sic*) de la veine faciale.

A sa terminaison, cette branche de la temporale s'anastomose surtout avec le bouquet artériel sous-orbitaire, et les nombreux rameaux qui composent celui-ci sont innervés, à la fois, par des filets du facial et du trijumeau (nerf sous-orbitaire). Ce sont spécialement les filets palpébraux inférieurs, fournis par ce dernier nerf, qui entourent de leurs rameaux externes l'artère et la veine sous-orbitaires ; ils se prolongent sur les terminaisons de l'artère transversale de la face, ainsi que sur les ramifications de la faciale.

Or, cette richesse dans l'innervation vasculaire de la joue explique certains phénomènes : indépendamment de ces rougeurs fugitives qui colorent le visage, sous l'influence des émotions, et dont le mode de production presque soudain, la disparition et le retour rapides, sont évidemment en rapport avec une influence nerveuse, il est un point sur lequel l'attention est souvent appelée en clinique, je veux parler de la rougeur des pommettes dans la pneumonie (2).

On sait aussi que la tuberculose pulmonaire s'accompagne, dans ses périodes fébriles, d'injection vasculaire des joues. Mais, si ces faits sont d'une observation facile et quotidienne, leur interprétation ne me semble point aussi simple, et, ne pouvant m'étendre sur ce point, je renvoie, pour les détails théoriques, aux ouvrages mentionnés dans la note 2 ; les auteurs qui s'en sont occupés sont du reste d'accord pour rapporter ces rougeurs localisées à des troubles de l'innervation; mais je crois, d'après les détails qui précèdent, qu'il faut tenir compte, en outre de l'influence du sympathique cervical, de celle des nerfs facial et trijumeau.

Quant à la dilatation vasculaire permanente, variqueuse, qui constitue l'un des traits du facies cardiaque, elle semble plutôt

(1) Valentin, Sœmmering, Henle, etc., *loc. cit.*

(2) Gubler, *In Journ. Phys.*, 1858, p. 412. — Anal. avec notes de Brown-Séquard.

— Jaccoud, *Clinique*, 1867.

liée à une stase veineuse mécanique amenant la perte définitive de la contractilité.

Les nerfs qui se distribuent aux autres branches de la temporale seront étudiés à propos des régions correspondantes.

L'innervation vasculaire de la joue est complétée par les filets qui accompagnent l'artère buccale et l'alvéolaire supérieure. Ces deux artères, destinées surtout aux couches profondes, musculaire et muqueuse, proviennent de la maxillaire interne au niveau de son inflexion sur la tubérosité maxillaire; elles apportent avec elles les rameaux émanés du plexus déjà signalé à l'origine de la temporale (v. fig. 104 et 105), c'est-à-dire que le sympathique cervical, par le plexus carotidien, le trijumeau, par le nerf dentaire inférieur et par l'auriculo-temporal, contribuent à les innerver. Ajoutons-y des filets fournis par le nerf buccal, au delà du ptérygoïdien: « le buccal forme autour de la maxillaire interne des plexus provenant de l'éparpillement et de la réunion successifs de ses faisceaux (1). »

En résumé, les artères des joues, transversale de la face, faciale, sous-orbitaire, buccale, alvéolaire supérieure, reçoivent leurs nerfs du plexus carotidien, du facial et du trijumeau. (V. fig. 100.)

b) Nerfs vasculaires des régions labiale et mentonnière.

Nous avons vu tout à l'heure le bouquet artériel sous-orbitaire innervé par des filets du nerf maxillaire supérieur et du facial, les artères alvéolaire supérieure et buccale entourées de filets provenant du plexus rétro-maxillaire, à la formation duquel concourent le sympathique et le trijumeau (*maxillaire inférieur par le dentaire et l'auriculo-temporal*). A la lèvre supérieure, nous retrouvons les divisions terminales des mêmes artères accompagnées des mêmes nerfs.

Le bouquet artériel mentonnier, fourni par la dentaire inférieure, est innervé à la fois par des filets du dentaire (V. cav. buccale, dents) et du facial (nerf labio-mental, branche moyenne) (2).

Enfin, l'artère faciale, apportant dans l'épaisseur des lèvres par les coronaires des filets sympathiques du plexus caroti-

(1) Valentin, *Encyclop. anat.*, trad. Jourd., t. IV.

(2) Henle, Sœmmering, Meckel, Valentin, *Encyclop. anat.*

dien, reçoit en outre de nombreux rameaux du nerf bucco-labial inférieur et du labio-mental, branches du facial.

Ces nombreuses artères se distribuent, accompagnées de leurs nerfs, aussi bien dans les couches superficielles que dans la muqueuse des lèvres. Je n'aurai donc point à les décrire de nouveau comme faisant partie des parois de la cavité buccale.

Pour elles, comme pour celles des joues, nous retrouvons trois sources d'innervation : le plexus carotidien, les éléments vasculaires contenus dans le facial, et ceux qu'apporte le trijumeau.

c) *Nerfs vasculaires de la région du nez.*

L'artère ophthalmique, par la nasale externe et le rameau naso-lobaire de l'ethmoïdale, l'artère faciale par la branche de l'aile du nez et celle de la sous-cloison, se distribuent aux parties latérales, au dos et au lobule du nez.

La nasale externe reçoit des filets du nerf correspondant ; la naso-lobaire, terminaison de la nasale interne, est en rapport avec le filet terminal du nerf ethmoïdal (V. *fosses nasales*, *paroi externe*) ; enfin, les rameaux de l'artère faciale empruntent, comme nous l'avons vu, des filets au nerf facial (*bucco-labial et labio-mental*).

Ici encore, triple point de départ aux nerfs vasculaires de la région : plexus de la carotide externe pour la faciale, plexus caverneux pour l'ophthalmique ; enfin, nerfs facial et trijumeau.

La circulation du lobule du nez est très-active, comme le prouvent les congestions passagères ou chroniques dont cette région est le siége et qui se produisent sous des influences multiples, la facilité avec laquelle s'opère la cicatrisation même des parties détachées, et j'ajouterai la congélation facile du lobule, quoique cet accident ait été interprété tout autrement.

Une région, exposée de tous côtés comme celle-là au refroidissement, cède d'autant plus de calorique que la circulation s'y fait plus activement. Personne ne nie la richesse vasculaire de la pulpe des doigts, du lobule de l'oreille, et cependant ces régions se congèlent comme le lobule du nez. Celui-ci, il est vrai, subit en général le premier les effets du froid in-

tense, mais cela est dû à sa situation même qui l'expose plus que les autres parties. Je fais ici cette remarque, parce que je lis dans l'*Anatomie chirurgicale* du professeur Richet (1) une explication inverse qui m'a semblé peu en rapport avec ce que nous savons de la vascularité de la région.

d) Nerfs vasculaires des régions palpébrale et sourcillière.

La plupart des artères qui fournissent à ces deux régions connexes viennent de l'ophthalmique.

Aux paupières, les palpébrales supérieure et inférieure forment chacune une arcade : l'arcade supérieure s'anastomose surtout avec un rameau palpébral de la temporale superficielle, l'arcade inférieure, avec un rameau palpébral de la sous-orbitaire. En outre, on y trouve des ramuscules des frontales externe et interne, de la nasale et de la faciale.

A la région du sourcil, la principale artère est la sus-orbitaire anastomosée avec la frontale interne.

Sur chacune de ces artères, existent des filets sympathiques, provenant, pour les branches de l'ophthalmique du plexus caverneux, pour les rameaux de la sous-orbitaire du plexus que je désignais plus haut sous le nom de rétro-maxillaire, et dont on ne doit point oublier les sources multiples ; pour les rameaux de la temporale et de la faciale des différents nerfs déjà étudiés (sympathique, facial, trijumeau). Je dois signaler comme surajoutés des filets du nasal externe (sous-trochléaire) pour les deux arcades palpébrales, et des filets du frontal interne, anastomosés avec ceux du frontal externe, et formant un plexus autour de l'artère sus-orbitaire (*e*).

Dans ce quatrième groupe, comme dans les trois précédents, il est évident que les artères reçoivent leurs filets nerveux des plexus carotidiens externe et interne, et des nerfs facial et trijumeau.

(1) Richet, *Anat. chir.*, p. 302, éd. 1866.

Dans cette description, je me suis borné aux détails anatomiques; tous les filets que j'ai indiqués comme nerfs vasculaires, soit artériels soit veineux, ont été suivis et minutieusement décrits par les anatomistes dont les noms se retrouvent souvent dans mes notes; Arnold, Meckel, Wrisberg, les auteurs de l'*Encyclopédie anatomique* les mentionnent parmi les filets musculaires du facial, et parmi les filets cutanés ou muqueux du trijumeau; — ils insistent sur leurs rapports immédiats avec les vaisseaux. J'ai donc pu me dispenser dans ce qui précède d'invoquer, pour me fournir des renseignements sur le trajet ou la provenance de ces nerfs, les données de la physiologie ou de la pathologie; j'ai évité ainsi les longueurs que ne peut manquer d'entraîner tout emprunt fait à des résultats expérimentaux souvent peu d'accord entre eux, ou à des faits cliniques.

Dans ce qui va suivre, au contraire, je me vois obligé d'en user autrement, pour des motifs indiqués au début de cette étude. Cette remarque explique les développements dans lesquels j'ai dû entrer au sujet de l'innervation vasculaire des régions profondes de face.

B) — **Régions profondes de la face.**

a) Nerfs vasculaires des fosses nasales.

Le nerf sphéno-palatin externe (filets nasaux supérieurs), accompagne la branche externe de la sphéno-palatine sur les cornet et méat supérieurs et sur le cornet moyen (Sp *fig.* 101).

Le nerf sphéno-palatin interne (nerf de la cloison, nerf naso-palatin de Scarpa), « donne, chemin faisant, des rameaux à l'artère de la cloison (branche interne de la sphéno-palatine) qu'il enveloppe de fins réseaux » (1) (Sp *fig.* 102).

Les deux nerfs naso-palatins, arrivant à l'extrémité supérieure bifurquée du canal palatin antérieur, se termineraient

(1) Wrisberg, *Comment.*, t. Ier.

aux deux angles supérieurs d'un ganglion, sans arriver jusque dans la bouche (ganglion naso-palatin de Cloquet) (2). Arnold (3) nie l'existence de ce ganglion.

Cruveilhier (4) n'a jamais vu d'anastomose entre les deux nerfs naso-palatins, ni entre ces nerfs et le nerf palatin antérieur.

Le nerf palatin antérieur, (grand nerf palatin), entoure les branches nasales de l'artère palatine descendante (P. D. *fig.* 101 et 102), et innerve, par conséquent, les vaisseaux artériels qui rampent à la surface du méat moyen, du cornet inférieur et du méat inférieur. L'artère, devenant palatine proprement dite, le nerf continue à lui fournir des réseaux, mais au niveau du canal palatin antérieur où elle remonte à la rencontre de la naso-palatine, il n'est pas démontré, comme le dit Cruveilhier (*v. s*), que les filets nerveux la suivent dans ce trajet pour s'unir aux rameaux terminaux du nerf de la cloison.

En outre des artères sphéno-palatines, et palatines supérieures, branches de la maxillaire interne, les fosses nasales sont parcourues, dans leur région antérieure, par de nombreux rameaux artériels fournis par l'artère ethmoïdale antérieure, branche de l'ophtalmique, qui pénètre par la voûte et descend en se divisant en rameaux externes pour la partie antérieure des cornet et méat supérieurs, et en rameaux internes pour la partie antérieure de la cloison. C'est de ces derniers que part l'artère naso-lobaire; tous s'anastomosent avec les rameaux soit externes soit internes, de la sphéno-palatine.

A ce vaisseau est adjoint le filet ethmoïdal du rameau nasal (*branche de l'ophthalmique*) qui accompagne d'abord le tronc de l'artère ethmoïdale antérieure, au-dessus et en avant duquel il est placé dans le canal orbitaire interne antérieur; il lui abandonne manifestement un filet à ce niveau. Plus loin, ses divisions sont unies à celles de l'artère, mais la nature nerveuse de ces connexions ne me paraît point absolument démontrée; du reste, les anatomistes les plus minutieux (Bock,

(2) Cloquet, *Anat. descript.*

(3) Arnold, *Abhandlung über den Ohrknoten*, Heidelberg, 1828, et *Icones nervorum capitis*, Heidelberg, 1834.

(4) Cruveilhier, *Anat. descript.*, t. IV.

Langenbeck, Arnold, Swann, Valentin) (1) ne décrivent comme nerf vasculaire que le premier filet.

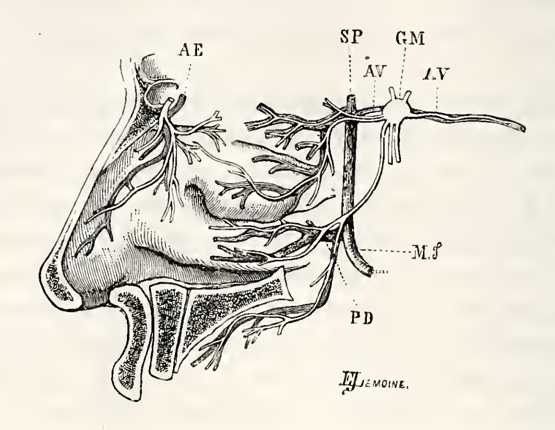


Fig. 101. — Nerfs vasculaires de la paroi externe des fosses nasales. — GM, ganglion de Meckel fournissant des filets pour les branches de la sphéno-palatine (SP.), de la palatine descendante (PD), pour l'artère vidienne (AV), branches de la maxillaire interne MJ. — AE, artère ethmoïdale accompagnée par le nerf ethmoïdal.

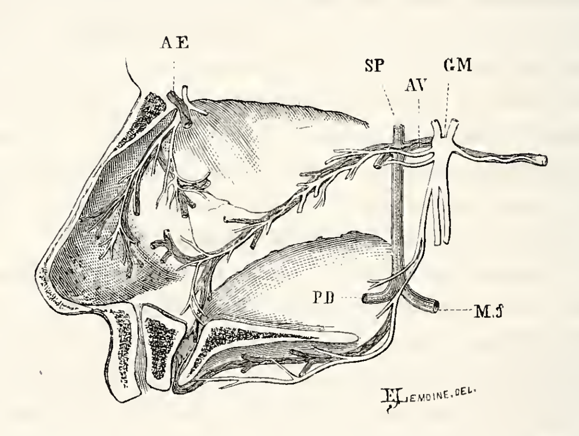


Fig. 102. — Nerfs vasculaires de la paroi interne des fosses nasales. — GM, ganglion de Meckel fournissant à la branche interne de la sphéno-palatine et à la branche inférieure de la palatine descendante PD, ainsi qu'à l'artère vidienne AV. — AE, artère ethmoïdale (branche interne) aux filets du nerf ethmoïdal.

(1) Bock, Meissen, 1817 et 1821.
Arnold, *loc. cit.*, Heidelb., 1828.
Swann, cité par Valentin, *Encyclop. anat.*, 1843.

En résumé, les artères des fosses nasales reçoivent leurs nerfs du ganglion de Meckel et de la branche ophthalmique. Or, ceux qui proviennent du ganglion de Meckel peuvent avoir leur source, soit dans le plexus carotidien qui fournit la racine sympathique de ce ganglion, soit dans le centre bulbaire lui-même, par le tronc du trijumeau qui, comme nous le verrons, emporte à la périphérie des éléments nerveux vasculaires puisés à cette origine, soit dans le facial, par le grand nerf pétreux superficiel.

Les nerfs vasculaires qui viennent indirectement de la branche ophthalmique, par le filet ethmoïdal, peuvent également provenir, soit du centre bulbaire, soit du plexus carotidien dont les anastomoses avec l'ophthalmique sont très-multipliées. Mais ces deux groupes de nerfs artériels sont loin d'être les seuls auxquels les vaisseaux soient subordonnés. La maxillaire interne est couverte, à son origine, de nerfs : 1° qui font suite au plexus de l'artère carotide externe ; 2° qui naissent du nerf auriculo-temporal, branche du maxillaire inférieur, et toutes les branches de cette artère, la sphéno-palatine et la palatine descendante comme les autres, emportent dans leur trajet des filets émanant de ces deux nouvelles sources. D'autre part, l'artère ophthalmique puise un grand nombre de filets sympathiques dans le plexus qui accompagne la carotide interne dont elle provient, et, comme tout à l'heure, les branches de ce vaisseau, l'ethmoïdale antérieure entre autres, ont leur part dans ces nombreux filets.

Ces détails doivent être pris en considération, quand on étudie les troubles vasculaires de cette région. Pour l'interprétation des désordres survenant de ce côté, soit à la suite de lésions expérimentales du trijumeau (*ablations du ganglion sphéno-palatin*, Claude Bernard), soit à la suite d'ablations du ganglion cervical supérieur, il ne faut point oublier à quelles nombreuses sources les vaisseaux des fosses nasales puisent leur appareil d'innervation.

Si, par exemple, on attribue comme le font quelques physiologistes, des fonctions différentes aux nerfs vasculaires provenant directement du grand sympathique et à ceux que fournissent les nerfs cérébro-rachidiens, les divisions que j'ai indiquées plus haut peuvent avoir leur intérêt ; mais, au fond,

cette innervation, si compliquée en apparence, peut être résumée ainsi : *Nerfs provenant des plexus sympathiques, filets provenant des nerfs crâniens* ; *les uns et les autres ayant leur source dans le centre nerveux encéphalo-médullaire.*

C'est, en somme, avec une dissociation plus marquée, la disposition que nous avons indiquée pour les nerfs vasculaires des membres. Nous avons vu (*schéma des membres*) les vaisseaux de ces régions recevoir leurs filets nerveux des branches émanant des ganglions thoraciques et abdominaux, lesquelles abordent directement les vaisseaux, et des nerfs mixtes rachidiens qui les ont eux-mêmes empruntés soit à la moelle par leurs racines, soit aux ganglions.

Prenons l'une des branches artérielles que nous avons suivies dans les fosses nasales, nous lui trouvons des filets provenant : 1° du sympathique cervical (plexus carotidien, plexus de la maxillaire interne, etc.) ; 2° du ganglion sphéno-palatin, en rapport lui-même avec un élément crânien sensitivo-moteur (nerf maxillaire supérieur et facial par le grand pétreux superficiel) ; 3° du nerf ethmoïdal, branche de l'ophthalmique.

J'ai déjà mentionné une provenance générale identique pour les nerfs vasculaires des régions superficielles de la face, et j'aurai assez souvent l'occasion de revenir sur cette assimilation de l'innervation vasculaire dans les régions les plus différentes, pour n'y point insister davantage en ce moment.

b) Nerfs vasculaires des arrière-fosses nasales.

Cette étude ne peut avoir d'intérêt qu'à la condition d'être reliée à celle des nerfs vasculaires du pharynx, car le réseau artériel de la partie supérieure est intimement uni au réseau artériel des parois latérales et postérieures ; mais, pour ne point abandonner l'histoire des filets vasculaires fournis par le ganglion de Meckel, je crois devoir ajouter quelques détails au sujet de ceux qui entourent l'artère ptérygo-palatine et surtout l'artère vidienne.

La ptérygo-palatine est accompagnée par des filets émanant soit du ganglion, soit des nerfs palatins eux-mêmes, et ces

nerfs la suivent jusqu'à sa terminaison dans la trompe d'Eustache.

L'artère vidienne, dans son trajet intra-osseux, de la fosse ptérygo-maxillaire à la paroi latérale supérieure du pharynx où elle s'épanouit autour de la trompe d'Eustache, est entourée de rameaux nerveux appliqués les uns contre les autres, formant à première vue un nerf unique, *le nerf vidien*. Mais ce nerf vidien est loin d'être simple ; il contient, à coup sûr, au moins deux ordres de filets : *a*), le grand nerf pétreux superficiel qui relie le genou du facial au ganglion de Meckel ; *b*) les filets sympathiques ; ces derniers sont groupés d'habitude sous le nom de filet carotidien du nerf vidien (1), et considérés, surtout depuis Longet, comme portant au ganglion de Meckel sa racine sympathique, comme émanant du plexus carotidien et *se dirigeant vers le ganglion*. Cette conception du nerf vidien semble bien nette et satisfait dès l'abord. On est habitué à trouver, pour chaque ganglion, un triple système convergent : le nerf vidien contient deux éléments de ce système ; le troisième vient du tronc maxillaire supérieur lui-même.

Quand on considère quel grand nombre de filets ce nerf vidien abandonne à l'artère qui chemine dans le même canal, on peut supposer, tout d'abord, que ces filets vasculaires sont fournis par le plexus carotidien, puisque celui-ci donnerait la racine sympathique du ganglion de Meckel.

Mais je ferai d'abord remarquer qu'il serait bien étrange de voir ici, par exception, des filets sympathiques abordant une artère par son extrémité pour remonter vers son origine, (et c'est ainsi qu'il faudrait les comprendre, si l'on admet que la portion vasculaire du nerf vidien prend sa source dans le plexus carotidien). D'un autre côté, cette artère vidienne se déroberait donc à la règle qui gouverne l'innervation des autres branches nées de la maxillaire interne au voisinage du ganglion de Meckel ? Elle serait seule à n'en point rece-

(1) Filet carotidien du nerf vidien, dont on rapporte la découverte à Meckel (*de Quinto parc nervor.*); Gœttingue, 1748. (Voir *Scriptor.*, Ludwig, 1791, t. Ier et IV, et *de Ganglio nuper detecto*, Berlin, 1749), aurait été découvert par Duverney (suivant Lecat), 1717, ou par Heister ; Nurimbergæ, 1719 (suivant Longet, *Anat. et Phys.*, 1842).

voir de filets ; et sa voisine, la ptérygo-palatine qui suit un trajet parallèle, serait innervée, de son origine vers son extrémité, par des filets récurrents du ganglion de Meckel, tandis que la vidienne ne recevrait point de filets de cette source ?

L'analogie guide ici la description de ces nerfs vasculaires de l'artère vidienne ; et, sans nier le trajet admis classiquement pour le filet carotidien du nerf vidien, on ne peut se refuser à admettre des filets vasculaires, marchant en sens opposé, fournis par le ganglion sphéno-palatin et accompagnant l'artère. C'est en partie ce que Wrisberg a longuement développé, et, si sa description contient d'autres détails sur le trajet du nerf pétreux du facial, par exemple, ceux que je viens d'indiquer y sont consignés à un autre point de vue. Wrisberg (1), dont les idées sont adoptées dans l'*Encyclopédie anatomique* (2), n'a pas compris le nerf vidien comme Meckel, Bock, Hirzel, Langenbeck et Arnold (3) ; il dit que le plexus vidien tire ses fibres primitives du rameau récurrent du ganglion de Meckel et contracte ensuite d'intimes connexions avec le plexus carotidien. Les auteurs de l'*Encyclopédie anatomique* ajoutent que cette anastomose se fait par le grand nerf pétreux profond qui se détache de la partie supérieure de l'artère vidienne, et, se portant à peu près horizontalement en dehors, se continue avec les nerfs qui sont appliqués au côté externe de l'artère carotide interne. Quelquefois même (Valentin) cette branche anastomotique, très-longue, sort isolée de l'orifice inférieur du canal carotidien et *va se rendre au ganglion cervical supérieur.*

J'ai insisté sur cette constitution du nerf vidien, au point de vue des nerfs vasculaires qu'il contient, cette particularité me paraissant devoir être mise en lumière, sinon pour l'intérêt physiologique de l'innervation de l'artère vidienne, du moins pour le fait lui-même. L'existence de rameaux allant du ganglion de Meckel au plexus carotidien a pour moi une importance spéciale, et j'essayerai bientôt de réunir des faits

(1) Wrisberg, *Comment.*, t. Ier, p. 373-374.

(2) Sœmmering, Henle, Valentin, etc., *Encyclop. anat.*, trad. Jourdan.

(3) Bock, *Fuenftes nervenpaar*, tab. I et II. *Nachtrag*, tab. IV.
Hirzel, *Zeitschrifft für Physiol.*, t. Ier, tab. X.
Arnold, *Kopftheil*, tab. II.

analogues, qui serviront à prouver que le plexus carotidien, et par conséquent le ganglion cervical supérieur, s'ils envoient des filets, en reçoivent également qui peuvent être considérés comme filets originaires. Je n'en parle ici que pour mémoire, car l'étude du sympathique, dans ses rapports avec les nerfs crâniens, doit faire l'objet d'un chapitre séparé (V. 3e partie).

c) *Nerfs vasculaires de la cavité buccale.*

Les nerfs vasculaires de la cavité buccale (voûte palatine, joues, lèvres), ont déjà été étudiés à propos des régions superficielles de la face. Ceux des vaisseaux de la langue ne peuvent être décrits qu'après ceux qui se distribuent aux vaisseaux des glandes salivaires. Je renvoie donc leur étude après celle des nerfs vasculaires des glandes, que je vais maintenant exposer au point de vue anatomique et physiologique.

d) *Nerfs vasculaires des glandes salivaires.*

Appareil d'innervation de la glande sous-maxillaire. — (J'ai préféré commencer cette étude par les nerfs des vaisseaux de la glande sous-maxillaire, parce qu'ils sont mieux connus au point de vue anatomique et physiologique, et que leur description pourra être d'un grand secours dans la détermination plus controversée des nerfs vasculaires parotidiens.)

L'artère faciale qui fournit plusieurs branches, dont le fort calibre est hors de proportion avec la petitesse de la glande (Cruveilhier), et l'artère sous-mentale, branche de la première, apportent directement dans la glande sous-maxillaire les filets nombreux émanés du plexus carotidien (1).

Mais ces filets sympathiques ne sont pas les seuls que reçoivent les artères de la glande : il en est d'autres qui viennent du ganglion sous-maxillaire, lequel emprunte ses

(1) Haller, Iwanoff, Bock, Arnold. Ces filets, niés par quelques auteurs, ont toujours été retrouvés par Longet (*Anat. et Physiol. syst. nerv.*).

racines sympathiques aux rameaux qui entourent l'artère faciale (5, fig. 103).

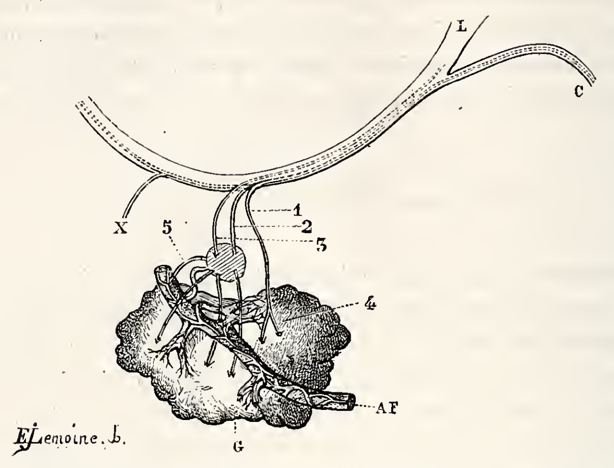


Fig. 103. — Schéma des nerfs de la glande sous-maxillaire G. — L, nerf lingual. — C, corde du tympan se prolongeant dans le lingual et fournissant : en 1, 2, 3 des filets pour la glande sous-maxillaire ; en X des filets pour la glande sublinguale, et continuant sa route vers la langue. — AF, artère faciale, avec filets sympathiques provenant du plexus de la carotide externe ; quelques-uns de ces filets se jettent en 5 dans le ganglion sous-maxillaire.

Le troisième groupe de nerfs qui se rend à la glande sous-maxillaire joue un grand rôle dans les variations circulatoires en rapport avec les variations fonctionnelles de cette glande : ce sont les filets que fournit la corde du tympan (C. fig. 103).

Ce nerf a son origine apparente au facial, et sa jonction au lingual n'empêche pas son isolement physiologique. Il se détache en partie du tronc du lingual, au niveau du ganglion sous-maxillaire, et se jette dans ce ganglion par certains filets (2 et 3, fig. 103) tandis que, par certains autres qui ne font que le contourner, il pénètre directement dans la glande (1 et 4, fig. 103). Cette indépendance de quelques-uns des rameaux glandulaires de la corde du tympan est représentée dans la figure ; nous aurons bientôt à y revenir.

Comment se comportent les divisions ultimes du nerf tympanico-lingual dans l'épaisseur de la sous-maxillaire, quels

(1) Vulpian, *Leçons sur le vaso-moteur,* 1874.

rapports affectent-elles avec les éléments fondamentaux de l'organe, culs-de-sac glandulaires et vaisseaux ?

La terminaison des filets de la corde du tympan dans les cellules épithéliales des culs-de-sac glandulaires ne serait pas douteuse, d'après Pflüger (1), et Wundt (2) dit à ce sujet : « Les fibres à double contour (cérébro-spinales), réduites à l'état de cylindre-axe, perforent la membrane cellulaire pour se terminer dans le noyau des cellules glandulaires (3). »

Cette indication de Wundt est beaucoup plus précise que celle de Pflüger lui-même. Celui-ci, en effet, a figuré les rameaux nerveux conservant leur myéline jusqu'à leur point de terminaison, ce qui est tout à fait en désaccord avec ce que nous savons des filets nerveux approchant de leur véritable terminaison : ceux-ci perdent leur myéline pour ne conserver que le cylindre-axe et la gaîne de Schwann. Wundt va donc plus loin que Pflüger, mais comme il ne dit point avoir lui-même constaté cet isolement du cylindre-axe, et ne décrit ces rapports des éléments nerveux que d'après Pflüger, tous les doutes (3) subsistent à cet égard, et nous ne sommes point autorisés à admettre cette terminaison nerveuse comme un fait acquis.

Tout est encore hypothèse au sujet de la terminaison de la corde du tympan par rapport aux vaisseaux, et c'est précisément à cette absence de renseignements anatomiques précis que nous devons les discussions actuelles sur le mode d'action de ce nerf.

Toujours est-il que le nerf qui nous occupe modifie le calibre des vaisseaux de la glande et que la sécrétion n'est que consécutive. Mais ce que je présente ici sous forme de proposition établie doit, pour être accepté comme tel, s'appuyer sur des faits.

Cl. Bernard a vu que l'excitation du bout périphérique de la corde du tympan détermine l'accélération du courant sanguin à travers la glande ; Ludwig avait déjà montré l'influence du même nerf sur la sécrétion salivaire.

(1) Pflüger, *Die Endig. der absunderungs nerv. in den Speïchledrusen*. Bonn, 1866.

(2) Wundt, *Physiologie*, 1872

(3) Budge, *Comp. physiol.*, 1874. Heidenhain, 1868. Bennett, Küss, Longet.

Quelques auteurs considèrent cette excitation du nerf comme agissant d'abord sur l'élément glandulaire, comme activant d'emblée les transformations épithéliales, puisque, d'après certains anatomistes, les fibrilles terminales aboutissent aux cellules épithéliales des culs-de-sac glandulaires ; dès lors, l'activité circulatoire observée surviendrait comme conséquence de l'activité sécrétoire qui serait le fait primitif; la sécrétion appellerait l'afflux sanguin.

Assurément, les épithéliums jouent un grandrôle dans la sécrétion ; depuis quelques années surtout on a dû s'en préoccuper.

Küss (de Strasbourg) insistait, en 1864, dans son cours dont j'ai revu à ce sujet les notes inédites, sur l'importance des épithéliums glandulaires ; depuis lors, cette question a été reprise avec plus de détails dans sa physiologie, par Mathias Duval. C'étaient du reste les idées de Dutrochet (1) qui, dès 1824, présentait une théorie des cellules sécrétoires.

De nombreux travaux, que je n'ai point à analyser ici, et dont on trouvera l'historique complet dans la thèse de Billet (2) et le mémoire de Chatin (3), nous démontrent surabondamment l'importance de la fonction épithéliale dans les glandes ; mais, s'ensuit-il que nous devions renverser les termes de la proposition, et, faisant rentrer ce cas particulier dans la théorie de l'attraction du sang par les tissus, dire qu'au lieu d'être cause, l'activité circulatoire devient effet?

On a pensé que la sécrétion pouvait se produire directement, sans que la circulation fût au préalable influencée par l'excitation du nerf tympanico-lingual, et l'activité circulatoire a été subordonnée à l'activité sécrétoire ; le grand nom de Ludwig (4) oblige à discuter la signification des expériences qu'il a pratiquées et sur lesquelles on s'est fondé (5) pour admettre cette opinion.

(1) Dutrochet, *Recherches anat. et physiol.*, 1824.
— Voir aussi Purkinje, *Bericht uber die Versammlung der naturforcher*, Prague, 1837.

(2) Billet, *Thèse Strasb.*, 1868.

(3) Chatin, Epithéliums des glandes en grappe (*Ann. sc. nat.*, 1874).

(4) Ludwig, *Zeitschrifft fur rat. Mediz.*, t. I[er], et *Lehrbuch d. Physiol*, t. II, 2e édition.

(5) Budge, *Compendium de Physiol.*, 1874, t. II, p. 321.

Ludwig a trouvé la pression de la salive dans le canal de Wharton plus forte que celle du sang dans la carotide ou la faciale, et la température de la salive plus élevée que celle du sang.

Je rappellerai d'abord qu'en 1851 Ludwig, et peu après ses élèves Rahn et Bécher, crurent pouvoir affirmer que la présence du sang en circulation dans les glandes n'est pas indispensable à la sécrétion ; mais Schiff, reprenant les expériences sur lesquelles était fondée cette conclusion, montra qu'en réalité, chez les chiens décapités, l'excitation de la corde du tympan ne produisait qu'une sécrétion presque nulle (en rapport du reste avec la petite quantité de sang conservée par la glande) ; Œhl remarqua une diminution considérable dans la sécrétion parotidienne chez l'homme dont on comprime les carotides.

La nécessité du sang en circulation a été encore démontrée par l'expérience suivante de Cl. Bernard (1) : après la ligature de l'artère qui se distribue à la sous-maxillaire, le sang ne coulant plus par les veines, l'excitation de la corde du tympan réussit à faire sortir quelques gouttes de salive, mais cette sécrétion s'arrête bientôt.

Si, maintenant, on se fonde, pour nier la relation de cause à effet entre la circulation et la sécrétion, sur ce que la pression intra-vasculaire a paru moins élevée à Ludwig que la pression dans le canal de Wharton, je ferai remarquer que Ludwig, en mesurant la pression dans le canal excréteur de la glande, a obtenu la somme des forces expulsives s'exerçant sur le liquide chassé au dehors par les contractions des canaux eux-mêmes, et que, dès lors, il n'y a guère de comparaison à établir entre le chiffre de la pression salivaire et celui de la pression sanguine.

M. Ranvier a bien voulu me communiquer les résultats de recherches entreprises autrefois sur cette question : je ne puis ici qu'en résumer les points qui ont spécialement trait à mon sujet.

L'excrétion salivaire se produit par l'action de la couche d'épithélium strié, de nature musculaire, qui double les canaux excréteurs. Quand on excite le nerf tympanico-lingual,

(1) Cl. Bernard, *Liquides de l'organisme*, tome II, p. 321.

cette couche striée entre en jeu, et doit nécessairement déterminer, pendant tout le temps que dure l'exitation, une élévation de la pression salivaire. Dans ses expériences, M. Ranvier s'est servi d'une boule de Liebig, dans laquelle plongeait un tube en communication avec le canal de Wharton, et d'où sortait un second tube mis en rapport avec un tambour à levier inscripteur; la salive en s'accumulant dans le fond de la boule, déplaçait une certaine quantité d'air, qui, s'échappant par le tube du tambour, actionnait la membrane et le levier qu'elle supporte; il obtenait ainsi une courbe qui s'élevait tant que durait l'excitation du nerf. Or, si, comme cela semble très-probable, les filets terminaux de la corde du tympan aboutissent aux éléments striés des canaux excréteurs, on s'explique facilement l'élévation de la pression salivaire comme la conséquence de l'activité de l'épithélium strié, et nous n'avons plus à mettre en opposition cette pression de la salive expulsée avec la pression du sang dans la carotide ou la faciale.

Quant à la seconde objection, tirée de la température plus élevée de la salive que du sang artériel, elle me semble plaider simplement en faveur d'une élaboration intermédiaire entre le facteur circulation et le facteur sécrétion. Je parlais tout à l'heure des transformations épithéliales; je puis ajouter ici les transformations chimiques des matériaux empruntés au liquide sanguin; modifications mystérieures encore, mais qui, pour n'être point déterminées dans leurs caractères, n'en sont pas moins certaines. Je comprends ainsi que le produit de sécrétion ait une température plus élevée que le sang qui en fournit les éléments.

Ce n'est point par conséquent sur les expériences du grand physiologiste allemand, pas plus que sur une terminaison problématique de la corde du tympan dans les éléments épithéliaux des acini de la glande, qu'on pourra s'appuyer pour discuter l'antériorité de l'acte circulatoire.

Bien loin de là, les arguments ne manquent pas pour démontrer l'indépendance de la circulation par rapport à la sécrétion.

Cl Bernard a vu que l'activité circulatoire précédait la sécrétion sous l'influence de l'excitation de la corde du tympan (1).

(1) Cl. Bernard, *Revue scient.*, 1872.

Giannuzzi (1) a constaté qu'après altération des cellules glandulaires par des injections de carbonate de soude ou d'acide chlorhydrique étendu dans les canaux excréteurs de la sous-maxillaire, l'excitation de la corde du tympan produit encore les phénomènes de suractivité vasculaire, quoique la glande cesse de sécréter : l'indépendance de la circulation est donc positive.

Cette indépendance ne ressort pas moins des faits suivants.

On sait que la sécrétion sous-maxillaire, comme les autres sécrétions salivaires, cesse de se produire sous l'influence de l'atropinisme. Heidenhain (2), reprenant les expériences de Keuchel (3), a utilisé cette donnée, pour démontrer que la circulation pouvait être activée dans le district vasculaire de la glande sous-maxillaire indépendamment de la sécrétion.

Ces expériences, comme celles que Eckhard (4) a pratiquées sur les nerfs érecteurs du chien, et qu'a répétées Loven (5), sont démonstratives au point de vue de l'indépendance de l'activité circulatoire par rapport à la sécrétion. Toutes parlent en faveur de l'antériorité de l'acte vasculaire; mais aucune ne me paraît mettre ces faits en lumière d'une façon aussi nette que celle du professeur Vulpian, à cause de la simplicité des conditions expérimentales dans lesquelles il s'est placé (il m'est permis d'en juger ainsi, quoique M. Vulpian ait surtout insisté sur les recherches des autres physiologistes et fourni les siennes simplement comme appoint à son argumentation). Il a vu (6) l'excitation de la corde du tympan produire, dans la moitié correspondante de la langue, une vascularisation identique à celle que Cl. Bernard a étudiée dans la glande sous-maxillaire, et cela, sans être accompagnée d'aucune modification sécrétoire.

En présence de ces expériences, l'action de la corde du tympan sur l'appareil vasculaire me semble bien établie

(1) Giannuzzi, *Berichte d. Kgl. Sachs. G.*, 1865 (cité par Wundt, *Physiol.*, p. 155).

(2) Heidenhain, *H. Pflüger's Archiv*, V, 40-45, analyse par Bernstein, *In Centralblatt*, p. 326, 1872; extr. *in Arch. phys.*, 1872.

(3) Keuchel, *l'Atropine et les nerfs d'arrêt*, Dorpat, 1868.

(4) Eckhard, *Beitrage zur Phys. d. Darmbewegung*, Leipzig, 1863.

(5) Loven (Ch.), Arbeiten, Ludwig, 1866.

(6) Vulpian, *Leçons sur les vaso-moteurs*, 1874.

comme fait isolé, et si l'un des deux facteurs de la sécrétion est primitif par rapport à l'autre, c'est, assurément, dans la sous-maxillaire comme dans les autres glandes, le facteur circulation.

Ce serait peut-être ici le lieu de passer en revue les différentes hypothèses présentées pour expliquer le mode d'action des nerfs dont l'excitation, physiologique ou expérimentale, est suivie comme celle de la corde du tympan, de tous ces phénomènes : dilatation des petits vaisseaux artériels et veineux, cours plus rapide du sang et pulsations des veines voisines, coloration rouge du sang veineux ; phénomènes liés les uns aux autres, et dont le principal, la dilatation vasculaire, tend aujourd'hui à être considérée comme un fait actif, comme l'expression directe de la fonction du nerf.

Je crois cependant devoir me borner, pour le moment, à écarter, avec les arguments fournis par le professeur Vulpian, la théorie renouvelée par Brown-Sequard, de l'attraction du sang par le tissu en fonction, que ce tissu soit une glande ou un autre appareil, et de bien établir ce fait, que la corde du tympan agit sur le réseau vasculaire de la glande. — Cela, du reste, ne s'oppose nullement à ce qu'on puisse admettre une action concomitante sur l'élément sécréteur lui-même, au cas où les recherches de Pflüger viendraient à être sanctionnées par un nombre de preuves suffisant.

Appareil d'innervation de la glande sublinguale. — Je ne pourrais que répéter pour la glande sublinguale (1) ce que j'ai dit de l'innervation vasculaire de la glande sous-maxillaire : elle reçoit, comme celle-ci, des filets de la corde du tympan, et des filets qui lui arrivent par les artères de la sublinguale. Le ganglion signalé par Blandin, et analogue au ganglion sous-maxillaire, n'est pas constant ; cette absence d'un ganglion sur le trajet des rameaux de la corde du tympan n'est pas, du reste, une condition nécessaire à l'action du nerf sur la glande. Claude-Bernard, en effet (2), dans ses recherches sur la glande sous-maxillaire, a déterminé les mêmes phénomènes de dilatation vasculaire en agissant sur le nerf, soit au-dessus, soit au-dessous du ganglion. « Nous avons

(1) Cl. Bernard, *Syst. nerv.*, t. II. p. 170.
(2) Cl. Bernard, *Liq. de l'organisme*, p. 300.

excité la corde du tympan avant ou après le ganglion, sans obtenir de différence sensible dans les résultats observés sur la glande. » Du reste, en se reportant à la figure 103, on voit qu'un certain nombre de filets de la corde du tympan ne font que côtoyer le ganglion sans y entrer. Ce détail prend une certaine importance théorique dans la discussion relative au mode d'action des nerfs dilatateurs. L'identité des effets produits sur les vaisseaux d'un organe par l'excitation d'un nerf dit vaso-dilatateur, qu'il y ait ou non des ganglions interposés, semble en effet contredire l'opinion développée surtout par le professeur Vulpian, et émise autrefois sous forme d'hypothèse par Claude-Bernard : que les vaso-dilatateurs agissent en suspendant l'activité des vaso-constricteurs par une sorte d'interférence (Claude Bernard), et que cette action suspensive s'exerce au niveau des ganglions (Vulpian) (1). Je sais bien que M. Vulpian a expliqué les exceptions de ce genre qui semblaient infirmer sa théorie, en s'appuyant sur ce qu'il existe, au sein des organes, de petits amas cellulaires, véritables ganglions microscopiques; de sorte que, dans le cas qui nous occupe, si le nerf vaso-dilatateur n'agit pas sur le ganglion principal, il agirait sur les groupes de cellules éparses dans la glande et à la surface des parois vasculaires. Son influence suspensive sur les vaso-constricteurs, pour avoir un siége plus profond, ne s'en exercerait pas moins.

Cette explication (qui s'applique également au cas où la dégénérescence des fibres sympathiques a été au préalable déterminée par l'arrachement du ganglion cervical supérieur), suppose qu'après l'arrachement du ganglion, toutes les fibres vaso-constrictives qui se rendent à la langue n'ont pas subi la dégénérescence. Ce n'est qu'à cette condition qu'on peut admettre l'intégrité persistante d'un certain nombre d'amas cellulaires intrinsèques, car il n'y a pas de raison pour que ces ganglions profonds soient plutôt respectés par la dégénérescence que les ganglions extérieurs. L'appareil terminal des nerfs dégénérés à la suite des sections wallériennes a toujours été trouvé atteint, aussi bien dans les muscles que dans les organes du tact, et, si l'on doit assimiler, comme

(1) Vulpian, *Leçons sur les vaso-moteurs*, 1874.

cela me paraît logique, les dégénérescences subies par les nerfs sympathiques aux dégénérescences de même cause qui se produisent dans les nerfs cérébro-spinaux proprement dits, il faut, de toute nécessité, que l'assimilation soit complète : il ne peut être fait d'exception en faveur des groupes cellulaires disséminés au sein des organes, aux points où se terminent les tubes nerveux sympathiques.

Le professeur Vulpian l'a compris ainsi, car, ayant dû respecter le lingual dans son expérience, il a reconnu que, par cette voie, un certain nombre de fibres vaso-constrictives, provenant d'une autre source que du ganglion cervical supérieur, étaient encore conduites à la langue. Ce fait rendait compte de la non altération des groupes ganglionnaires au sein de cet organe, et de l'action identique de la corde du tympan dans la moitié de la langue du côté de l'arrachement du ganglion cervical supérieur, et dans la moitié opposée.

Je crois que, pour contrôler l'interprétation précédente, une expérience complémentaire était nécessaire. Le lingual qui, en effet, contient bien des fibres sympathiques ne provenant pas du ganglion cervical supérieur, ne peut les recevoir que de la 3e branche du trijumeau (par anastomoses intra-crâniennes ou par provenance directe du bulbe rachidien) ; il y avait donc lieu de pratiquer la section du nerf maxillaire inférieur ; c'était une contre épreuve à tenter.

Même après cette contre-épreuve, il eût fallu en fournir une plus complète, car le grand hypoglosse contient, lui aussi, des fibres vaso-constrictives, ainsi que le démontrent les expériences de Schiff (1) et, comme il est probable qu'il lui en vient du bulbe lui-même, indépendamment de ses anastomoses avec le ganglion cervical supérieur, il devenait nécessaire de sectionner les racines bulbaires de ce nerf.

Dans ces conditions, toutes les sources d'innervation sympathique étant interrompues, la langue ne devait plus contenir de ganglions respectés par la dégénérescence; c'est seulement après ces opérations multiples que, l'excitation de la corde du tympan ne produisant plus de dilatation vasculaire,

(1) Schiff, *Ueber den Einfluss d. Nerv. auf die Gefasse der zunge* (*Arch. f. Physiol.*, Heilkunde, 1853).

ce nerf pouvait être présenté comme agissant à la faveur de ganglions dont il suspendrait l'influence vaso-constrictive. Je douterais cependant encore de la réalité de cette hypothèse, quand bien même ces mutilations nombreuses seraient pratiquées avec succès sur un même animal, et voici l'une des raisons de cette réserve. En prenant la question d'un autre côté, nous arrivons à conclure que, suivant M. le professeur Vulpian, l'action vaso-dilatatrice doit toujours pouvoir s'exercer si les ganglions sympathiques, extérieurs aux organes ou intrinsèques, volumineux ou microscopiques, conservent leur intégrité anatomique et physiologique.

Comment se fait-il dès lors que si on injecte dans les veines d'un chien une dose de chloral suffisante pour l'anesthésier complétement, il soit impossible de reproduire les effets vaso-dilatateurs ordinaires? Cependant l'appareil ganglionnaire est respecté, comme le prouve le rétrécissement des vaisseaux accompagnant la faradisation du cordon cervical du grand sympathique (1). Si les vaso-dilatateurs avaient pour condition suffisante de leur fonction la conservation des ganglions placés sur le trajet des nerfs sympathiques, leur excitation en général, et en particulier celle du nerf présenté comme un type de cette catégorie, la corde du tympan, devrait être suivie de ses effets ordinaires.

M. Vulpian a donc conclu, avec toute raison, que « nous ne sommes pas certains de posséder la véritable théorie de ces actions vaso-dilatatrices, et que de nouvelles recherches sont nécessaires pour dissiper les obscurités qui les enveloppent encore. »

Quoi qu'il en soit, la dilatation des vaisseaux de la glande sous-maxillaire, de la glande sublinguale et très-probablement d'un grand nombre d'autres glandes acineuses annexées à la cavité bucco-pharyngée (2), se produit sous l'influence de l'excitation de la corde du tympan. Si nous ignorons absolument le mode d'action de ce nerf, au moins savons-nous quel effet il produit.

(1) Vulpian, *Leçons sur les vaso-moteurs*, préface.

(2) Cl. Bernard, *Syst. nerv.*, t. II, p. 146, a pu suivre un filet récurrent de la corde du tympan jusque dans une masse glandulaire du voile du palais et du pharynx.

Innervation parotidienne. — L'influence de la corde du tympan, établie pour les glandes précédentes, s'étend-elle à la parotide, ou bien l'appareil nerveux de cette dernière est-il constitué aux dépens d'autres éléments? Question complexe, soulevée autrefois par Cl. Bernard, qui, après avoir éliminé l'influence des nerfs faciaux superficiels (1), arriva à conclure d'une série d'expériences, que les nerfs qui font sécréter la parotide se détachent du facial dans son trajet intra-crânien, et ne peuvent être représentés que par le petit pétreux superficiel qui va au ganglion otique.

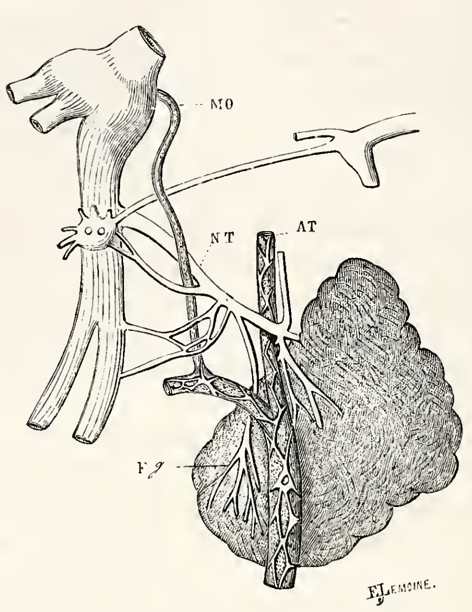


Fig. 104. — Schéma des nerfs parotidiens. — AT, artère temporale. — MO, méningée moyenne. — NT, nerf auriculo-temporal naissant de la branche maxillaire inférieure, du ganglion otique, du nerf dentaire inférieur et formant un plexus entre l'origine de la temporale et celle de la maxillaire interne. — *Fg*, filets glandulaires de ce nerf.

Mais, dit-il, « cette hypothèse suppose, entre la parotide et le ganglion otique, des communications que les anatomistes n'ont pas signalées, et que la physiologie nous porte à admettre (2)... »

Ces communications entre le ganglion otique et la paro-

(1) Cl. Bernard, *Syst. nerv.*, t. II, p. 154, — et *Liq. organ.*, t. II, p. 355.
(2) Cl. Bernard, *Syst. nerv.*, t. II, p. 158.

tide existent incontestablement par l'intermédiaire du nerf auriculo-temporal. L'anastomose entre le ganglion otique et le nerf auriculo-temporal se fait (Arnold (1), Weber (2) en deux points principaux (fig. 104) : 1° avec la racine supérieure de ce nerf fournie par la branche maxillaire inférieure; 2° avec les racines inférieures venant du nerf dentaire, un peu au dessous de la bifurcation du tronc maxillaire.

Or, le nerf auriculo-temporal forme, dans l'intervalle qui sépare la méningée moyenne de la temporale, un riche plexus qui fournit à toutes les artères voisines, et, entre autres, aux branches qui pénètrent dans la parotide ; il présente quelquefois, à ce niveau, de petits ganglions (3) et se divise en plusieurs rameaux dont quelques-uns traversent la glande parotide en lui abandonnant des filets.

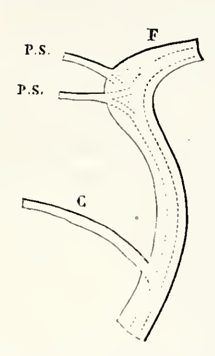


Fig. 105. — Schéma du trajet de la corde du tympan dans l'épaisseur du facial F et rapports des nerfs pétreux superficiels PS, PS, avec ses fibres, au niveau du ganglion géniculé.

L'induction physiologique avait donc suffi à Cl. Bernard pour lui faire indiquer des communications que des dissections minutieuses avaient démontrées à Arnold et à Weber. Aujourd'hui, on trouve ces anastomoses indiquées dans l'atlas de Hirschfeld et dans les traités d'anatomie qui lui ont emprunté ses figures. J'ai eu moi-même l'occasion de les rencontrer nettement, une fois surtout, sur une pièce de concours pour le prosectorat en 1871 (4).

(1) Arnold, *Kopftheil*, tab. IX. — *Icones nerv. cap.*, tab. V.
— *Tab. Anat.*, fasc. 2, tab. VI; Zurich, 1837.

(2) Weber, *Reil's Archiv.*, tab. VIII.

(3) Cruveilhier, t. III, p. 528.

(4) Musée de l'Ecole de Bordeaux. F. F.

Mais c'est l'origine de ces filets nerveux, émanant de la portion intra-crânienne du facial, passant avec le nerf petit pétreux superficiel dans le ganglion otique, de là par ses anastomoses avec les deux rameaux du nerf auriculo-temporal sur les vaisseaux parotidiens, c'est, dis-je, l'origine précise de ces filets qui me semble très-difficile à indiquer. Voici cependant ce que l'anatomie nous enseigne à ce sujet :

1° La *corde du tympan* communique avec le petit pétreux superficiel au niveau du plexus tympanique, (le nerf petit pétreux se fortifie par l'anastomose avec le plexus tympanique) (1) auquel la corde du tympan contribue comme l'indique Valentin (2) (C. Fig. 106).

2° Le plexus formé sur la partie la plus antérieure du rocher, par des *ramuscules de la corde du tympan* (C), du plexus tympanique (glosso-pharyngien), et du nerf temporal superficiel, est en rapport, par un ou plusieurs filets, avec la partie postéro-inférieure du ganglion otique (fig. 106).

Ces connexions entre la corde du tympan et le ganglion otique sont les seules que l'anatomie nous indique ; l'une, celle qui relie la corde du tympan au ganglion par le petit pétreux, semble avoir une grande importance comme origine des filets vasculaires parotidiens. Si l'on en croit Wundt (3) : « Pour la parotide, dit-il, si l'on excite la corde du tympan ou le filet qui part de ce nerf pour se rendre à cette glande, le petit pétreux superficiel, on voit la sécrétion augmenter de quantité et devenir plus aqueuse, » etc.

J'ignore à quelle source le professeur Wundt a puisé ce résultat ; mais, d'après son texte, le fait semble bien positif. Il est regrettable que l'auteur soit aussi bref à ce sujet, et qu'il n'indique pas le point au niveau duquel la corde du tympan a été excitée ; cela nous eût éclairé peut-être sur le lieu d'origine de l'anastomose avec le ganglion otique par l'intermédiaire du pétreux.

Mais il est un détail qui peut avoir son intérêt, toujours au même point de vue, et que je ne veux pas omettre. Arnold (4),

(1) Arnold, *Kopftheil. — Icones. — Tab. Anat.*,

(2) *Encyclop. anat.*, t. IV, trad. Jourdan.

(3) Wundt, *Physiol.*, p. 158, trad. Bouchard, 1872.

(4) Arnold, *loc. cit.*

Bidder (1), Fœsebeck (2), Valentin (3) ont vu le nerf petit pétreux superficiel (P 2, fig. 106) bifurqué dans l'épaisseur du ganglion géniculé. En suivant la branche de bifurcation inférieure, ils ont remarqué qu'elle se confondait avec les fibres de la corde du tympan (C) remontant dans le tronc du facial (F) vers le centre (fig. 105 et 106).

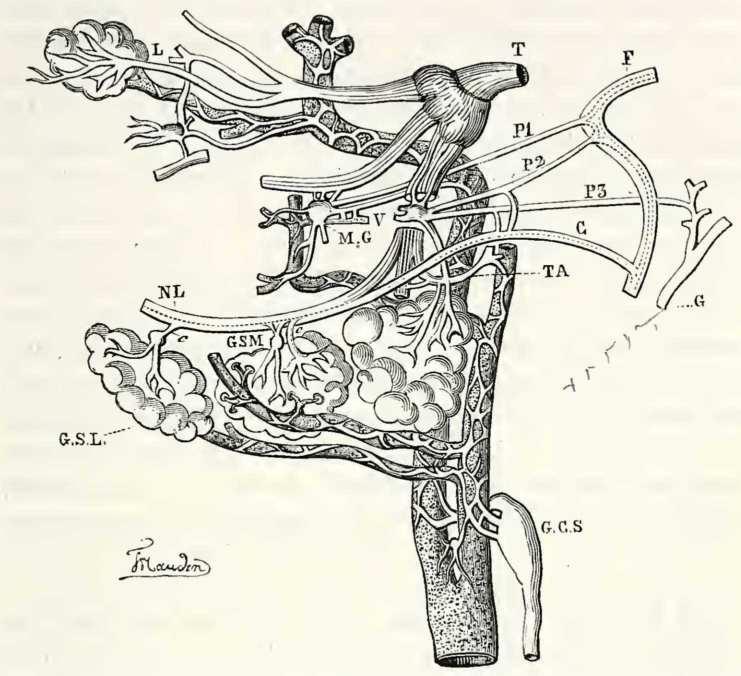


Fig. 106. — Schéma général des nerfs glandulaires. — F, tronc du facial avec lignes ponctuées montrant les communications entre les pétreux P1 P2 et la corde du tympan C. — TA, nerf auriculo-temporal avec filets parotidiens; ses racines au ganglion otique, au maxillaire inférieur et au dentaire. — MG, ganglion de Meckel avec filets arteriels pour les fosses nasales. — NL, nerf lingual et, *c c*, filets glandulaires sous-maxillaires et subl. — NL, nerf lingual.— GCS, ganglion cervical supérieur.

Sommes-nous dès lors autorisé à admettre une nouvelle voie de communication entre la corde du tympan et le ganglion otique? Le nerf petit pétreux superficiel, du moins pour les filets vasculaires qu'il contient, ne serait-il donc autre chose qu'une branche de la corde du tympan?

(1) Bidder, *Neurologische Beobachtungen*, Dorpat, 1836.
(2) Fœsebeck, *Muller's Archiv.*, 1840, et *Die Nerven des menschlichen Kopfer*, Brunswick, 1840.
(3) Valentin, *Muller's Archiv.*, 1840, — et *Encyclop. anatomique*

Une disposition identique a été indiquée par les mêmes auteurs pour le nerf grand pétreux superficiel ; ils ont vu ce nerf se diviser, dans le renflement ganglionnaire du facial, en un filet ascendant et un filet descendant ; ce dernier, comme le filet du petit pétreux dont je viens de parler, se confondrait avec la corde du tympan. Or, reportons-nous à l'innervation vasculaire des fosses nasales (fig. 101 et 102). Ce même nerf grand pétreux superficiel se jette dans le ganglion de Meckel d'où partent des filets pour les artères sphéno-palatine, palatine descendante, ptérygo-palatine et vidienne ; il pourrait, lui aussi, rentrer dans la catégorie des filets fournis par la corde du tympan, de sorte que ce dernier nerf commanderait par ses branches nasales (grand nerf pétreux superficiel) à la sécrétion muqueuse naso-pharyngienne ; par ses branches sub-linguale et sous-maxillaire, à la sécrétion salivaire des glandes correspondantes et de la muqueuse bucco-pharyngée ; par ses filets parotidiens (nerf petit pétreux superficiel), à la sécrétion parotidienne ; sur le trajet de chacun de ces groupes de nerfs se trouvent les ganglions de Meckel, sublingual (?), sous-maxillaire et otique. Ce serait, en définitive, le même tronc qui, par des voies différentes, souvent très-compliquées, présiderait aux sécrétions nasale, buccale et pharyngienne. (Voir le schéma général des nerfs glandulaires (fig. 106).)

Voilà à quelle conclusion physiologique générale nous amènerait la notion anatomique. Mais, quoique cela n'ait rien d'illogique, quoique, dans un autre ordre d'idées que je ne puis exposer ici, ces rapports des nerfs pétreux avec la corde du tympan rendent en grande partie compte des expériences de Schiff (1) sur les nerfs du goût, et que les troubles de la gustation (2) observés à la suite des lésions profondes du facial s'accordent encore avec le trajet indiqué, j'ai été trop souvent à même, dans les recherches que j'ai pu faire sur la question de l'innervation vaso-motrice, de constater les graves inconvénients des généralisations hâtives, pour admettre et présenter comme suffisant le système précédent. Il n'a pour moi d'autre avantage que de résumer en quelques mots

(1) Schiff, *Physiol. de la digestion*, et supplément.
— Voir aussi Prévost, *Journ. de phys. de Brown-Séquard*, 1868.
(2) Cl. Bernard, *Observ. d'hémipl. faciale, syst. nerv.*, t. II.

une série de faits complexes, et de traduire fidèlement le schéma des nerfs glandulaires que j'ai joint au texte (fig. 106).

Pour terminer avec la corde du tympan, je n'ajouterai qu'un mot : c'est que l'anatomie ne nous démontre point sa continuité avec le nerf intermédiaire de Wrisberg. A ce sujet, j'ai demandé des renseignements à l'anatomie comparée et n'ai rien trouvé qui m'autorisât à admettre cette continuité. Cette idée s'abrite cependant sous un grand nom ; sans nier le fait, je me contente de dire que l'expérimentation sur les animaux et la dissection chez l'homme ne l'ont point démontré.

D'autre part, Valentin (1), suivant de bas en haut la corde du tympan dans le tronc du facial, a indiqué son trajet dans la grande racine de ce nerf, et ne parle point de ses rapports avec l'intermédiaire.

Si nous comparons l'innervation vaso-motrice des glandes salivaires à celle des fosses nasales, comme nous avons comparé celle-ci à celle des autres régions, nous y verrons encore *les vaisseaux innervés par des filets sympathiques apportés du ganglion cervical supérieur par les artères afférentes, accompagnant les nerfs lingual, hypoglosse, etc., et par des nerfs appartenant au système cérébro-rachidien et distincts des premiers au point de vue physiologique* (*corde du tympan, auriculo-temporal*).

Innervation vasculaire de la langue. — La langue reçoit, comme nous l'avons vu plus haut, p. 196, fig. 103, des filets de la corde du tympan qui exercent sur ses vaisseaux la même influence que sur ceux des glandes sous-maxillaire et sublinguale.

Mais les vaisseaux de la langue apportent avec eux un grand nombre de filets, empruntés au rameau carotidien du ganglion cervical supérieur, qui forment autour d'eux des plexus pénétrant, avec les branches artérielles, jusque dans les papilles mêmes de la langue (Huguier) (2).

Le nerf lingual (corde du tympan mise à part), contient aussi des filets du même ordre reçus du tronc dont il émane. Nous savons en effet que le tronc (T) du trijumeau (fig. 132), le gan-

(1) Valentin, *Névrolog.*, trad. Jourdan, 1843.
(2) Huguier, cité par Longet, Sappey, etc.

glion de Gasser, ainsi que chacune des branches qu'il fournit, sont en rapport avec le plexus de la carotide interne dont ils reçoivent et auquel ils envoient des rameaux.

Indépendamment de ces anastomoses avec le sympathique qui entoure la carotide, nous pouvons, en nous appuyant sur l'expérimentation (*V. altérations oculaires consécutives aux lésions du trijumeau*) admettre, dans le tronc même de ce nerf, des filets empruntés au centre bulbaire et suivant les branches à la périphérie comme les filets analogues des nerfs rachidiens.

L'expérience directe (1) a du reste démontré, dans le nerf lingual, l'existence de filets sympathiques (*V. S. discussion de la théorie vaso-dilatatrice*) sur des animaux ayant subi l'ablation d'un ganglion cervical supérieur et présentant déjà un certain degré de relâchement vasculaire dans la moitié correspondante de la langue. Dans ces conditions, la section du lingual détermine une dilatation vasculaire plus grande, accusée par une teinte plus foncée de la muqueuse.

Enfin, le nerf moteur de cet organe, le grand hypoglosse, apporte aussi sa part de filets sympathiques. J'ai déjà rappelé à ce sujet l'expérience de Schiff, l'arrachement du grand hypoglosse et la vascularisation qui en a été la conséquence du côté de la langue.

Ce nerf s'anastomose, au passage, avec le ganglion cervical supérieur, et il peut, tout en abandonnant à celui-ci un certain nombre de filets, en recevoir qu'il emporte à la périphérie. Mais nous savons d'autre part que les racines antérieures des nerfs rachidiens (V. S. Fig. 96, sympathique rachidien) contiennent des éléments vaso-moteurs fournis par les régions antérieures de la moelle (2). Or, le nerf grand hypoglosse appartient évidemment à la série des racines antérieures, et, à ce titre, doit être muni d'un système radiculaire sympathique.

Ainsi, à ce point de vue déjà, le ganglion cervical supérieur recevrait du centre bulbaire, par le grand hypoglosse, (racine antérieure), des filets sympathiques (V. 3e partie), et le nerf

(1) Vulpian, *Vaso-moteurs*, 1874.

(2) *Dégénérescence wallérienne*, Vulpian, Courvoisier, Giannuzzi, etc. Pflüger, *Excitation des racines antérieures du sciatique*, *Allgem. mediz. Centralzeitung*, 1855, et *Canstatt's Jaresb.*, t. Ier, 1855.

en emporterait à la périphérie, après lui en avoir abandonné, à la façon d'un nerf rachidien.

J'utiliserai plus loin ces indications quand j'essaierai un rapprochement plus général entre les nerfs crâniens et les nerfs rachidiens, au point de vue de leurs rapports communs avec le sympathique.

En ce moment, je veux seulement comparer l'innervation vasculaire de la langue à celle des autres régions précédemment étudiées, et il me suffit, pour cela, de résumer les sources auxquelles elle emprunte ses vaso-moteurs :

Sympathique libre (plexus artériels), nerfs appartenant au système cérébro-rachidien, lingual, corde du tympan et hypoglosse.

Nerfs vasculaires des dents de la mâchoire supérieure (1). — Les nerfs dentaires antérieurs accompagnent d'un grand nombre de filets les artères dentaires antérieures.

Dans le sinus maxillaire, les arcades anastomotiques entre les nerfs dentaires postérieurs et les dentaires antérieurs donnent de nombreux filets aux vaisseaux ayant la même direction.

De ces arcades, ainsi que des nerfs alvéolaires supérieurs, moyens et antérieurs, partent de véritables petits plexus envoyant des filets, dans les canalicules osseux, sur les vaisseaux sanguins qui les parcourent.

La pénétration de ces filets nerveux a lieu avec les vaisseaux, dans la pulpe dentaire, soit par de petits canalicules situés à l'extrémité de la racine et au-dessous de l'ouverture principale, soit par de petites fissures latérales.

Nerfs vasculaires des dents de la mâchoire inférieure. — Le nerf dentaire inférieur (2) fournit des filets qui forment, dans

(1) Bochdaleck, *Œsterreischische Jarbücher*, t. XIX.
(Description très-complète des nerfs vasculaires des dents, spécialement de leur mode de terminaison dans les follicules dentaires).
Et Bock, Arnold, Weber, *In Encyclop. anatom.*, t. IV.

(2) Fitzau, *De tertio ramo paris quinti.*
Langenbeck, Arnold, Fœsebeck, *loc. cit.*

le canal dentaire, des réseaux nerveux très-denses accompagnant toutes les divisions de l'artère dentaire inférieure et les entourant de leurs ramifications.

Ces artères reçoivent en outre leur part de l'innervation complexe de la maxillaire interne (V. S.).

(A suivre.)

VI

EXPÉRIENCES SUR LA RÉSISTANCE DE L'AIR, POUR SERVIR A LA PHYSIOLOGIE DU VOL DES OISEAUX.

Deux mémoires, précédemment publiés sur la physiologie du vol (1), avaient pour but de prouver que les mouvements de l'oiseau sont susceptibles d'une analyse délicate ; que les plus petits détails du coup d'aile sont retracés par les appareils inscripteurs, tandis qu'ils échappent à peu près complétement à notre examen.

Toutefois, certains naturalistes ont acquis, par une longue pratique, une grande habitude de l'observation. Plusieurs auteurs ont aperçu, dans le vol des oiseaux, certaines particularités que j'aurais cru impossible de constater par la vue. Mais lorsque, par des expériences probantes, on a réussi à se convaincre de la réalité d'un phénomène, il devient relativement facile de l'observer. Je sais voir aujourd'hui le trajet elliptique de l'aile, chez les gros oiseaux du moins, et tout récemment, j'ai réussi à voir les changements de plan qui accompagnent les mouvements d'abaissement et d'élévation de l'aile de l'oiseau. Voici dans quelles circonstances.

Dans un grand port (2) où les goëlands jouent par centaines

(1) Voyez deux mémoires *Sur le vol des Insectes et des Oiseaux* (*Bibliothèque des hautes études*, t. I et V, et *Annales des sciences naturelles*, 1869 et 1872).

(2) Constantinople, la Corne-d'Or vue du pont de Galata.

et où ces oiseaux, familiarisés avec la présence de l'homme, volent à quelques mètres à peine des ponts et des navires, on peut choisir à son gré les sujets favorables à l'observation. Les variétés de teintes du plumage, les incidences de la lumière, la direction du vol, tout peut être mis à profit. Or, si l'on observe un de ces oiseaux volant à une faible hauteur et fuyant en ligne directe, on voit que son aile prend alternativement deux apparences différentes : elle est, pour ainsi dire, tour à tour visible et invisible. Avec plus d'attention, on constate que, dans les moments où l'aile est presque invisible, cela tient à ce qu'on la voit suivant sa tranche, tandis que dans les instants où elle devient très-visible, l'aile semble épaissie. L'épaississement porte exclusivement sur la moitié externe de l'aile, au voisinage de sa pointe ; il est produit par une torsion qui oriente un peu en arrière la face inférieure de l'aile. Le doute n'est pas possible à ce sujet quand le soleil, vers l'heure de midi, éclaire vivement la face supérieure de l'aile de l'oiseau, on constate que c'est la face non éclairée qui apparaît d'une manière intermittente ; c'est donc bien sa face inférieure. Si, ensuite, on cherche à saisir le rapport des changements de plan de l'aile avec les mouvements verticaux de cet organe, il est très facile de voir que l'épaississement se produit au moment où l'aile s'abaisse. Ces observations confirment donc entièrement les expériences graphiques précédemment décrites (1) et sont en parfaite concordance avec la figure qui représente les changements de plan de l'aile aux différents instants du vol.

La contre-épreuve de l'observation que je viens de citer n'est pas moins facile à faire. Qu'on se place sur un lieu plus élevé, et qu'on choisisse, pour l'observation, un oiseau qui vole en fuyant et dans un plan situé un peu plus bas que l'observateur (2) ; il se produit alors un phénomène inverse de celui qu'on voyait tout à l'heure. On constate des éclipses intermittentes de l'éclat de l'aile, dans le voisinage de son extrémité. Ces éclipses tiennent à ce que, au lieu de voir la face supérieure fortement éclairée de l'aile, on n'en voit plus que la

(1) *Bibliothèque des hautes études*, tome V, page 61.

(2) Il est utile de choisir un oiseau d'un plumage très-blanc, fortement éclairé par en haut.

tranche à certains moments. Or ces moments sont ceux de l'abaissement de l'aile, ainsi qu'on pouvait le prévoir.

Il est bien entendu que ces phénomènes n'arrivent que dans le vol ramé ; pendant le planement, au contraire, on constate une fixité complète du plan de l'aile. Dans ces conditions aussi, l'observation offrait de l'intérêt.

Je cherchais à déterminer l'inclinaison du plan de l'aile par rapport à l'horizon ; pour cela, je me repérais sur les lignes horizontales du voisinage, et je crayonnais sur mon carnet, à différentes pages, l'angle que le plan de l'aile me semblait faire avec ces lignes. Tous ces angles coïncidaient entre-eux d'une manière à peu près parfaite ; mesurés au *rapporteur*, ils correspondaient environ à 10 degrés.

Enfin, un jour de vent, j'ai pu faire, sur des milans, une observation relative aux mouvements de la queue. Quand il fait du vent, ces oiseaux abandonnent à peu près complétement le vol ramé et se mettent à planer en décrivant ces cercles, comme tout le monde l'a vu. J'ai constaté qu'en parcourant ces cercles, les milans changeaient assez brusquement l'orientation de la queue ; au lieu de la tenir horizontalement étendue, ils en tournaient obliquement la face inférieure, tantôt à droite, tantôt à gauche. Ces changements se produisaient en deux points diamétralement opposés de l'orbite parcourue ; ils avaient lieu au moment où l'oiseau commence à recevoir le vent par le travers. Or, grâce à cette situation oblique du plan de la queue, celle-ci recevait toujours le vent par en-dessous. Une telle manœuvre doit être destinée à soutenir la partie postérieure du corps de l'oiseau, par une action analogue à celle du cerf-volant.

Je n'insiste pas plus longuement sur ces observations qui ne révèlent rien de bien imprévu dans le mécanisme du vol, et j'aborde une nouvelle série d'expériences qui m'ont paru être le complément nécessaire de l'étude des mouvements de l'oiseau. Il s'agit de la détermination de la résistance de l'air pour des mouvements de vitesse moyenne : n'excédant pas 20 mètres par seconde.

On a vu, par les expériences précédentes (1), que l'air doit

(1) *Bibliothèque des hautes études*, t. V, p. 25.

présenter au mouvement d'abaissement de chacune des ailes une résistance un peu supérieure à *la moitié du poids* de l'oiseau tout entier. La valeur assignée par les différents auteurs à la résistance de l'air ne satisfait point à ces exigences ; c'est-à-dire qu'en tenant compte de la surface de l'aile et de la vitesse de son abaissement déterminée par l'expérience, on trouve que la résistance de l'air aurait une valeur beaucoup trop faible pour empêcher la chute de l'oiseau.

Les déterminations de la résistance de l'air sont extrêmement difficiles, et je n'aurais certainement pas osé les entreprendre, si la confiance entière que j'ai dans l'emploi de la méthode graphique ne m'eût encouragé à tenter l'aventure. Cette entreprise m'a engagé dans de longues recherches que j'ai été longtemps forcé d'interrompre et que le manque de temps et le défaut d'appareils suffisants ne m'ont pas encore permis de compléter.

DÉTERMINATION GRAPHIQUE DE LA RÉSISTANCE DE L'AIR.

Les expériences qui ont été faites jusqu'ici, pour mesurer la résistance de l'air, étaient toutes basées sur la même méthode. On imprimait un mouvement, rectiligne ou rotatif, à un corps léger et de grande surface ; quand la translation était devenue uniforme, on estimait, d'après le travail moteur dépensé à chaque instant, quel était le travail résistant produit par le déplacement de l'air. Déduction faite des résistances passives qui se produisent toujours dans les appareils rotatifs, le travail moteur et le travail résistant devaient être égaux. Le travail moteur était facile à estimer, pour chaque unité de temps, puisqu'il était produit par un poids connu tombant d'une hauteur connue.

Ce produit du poids par sa hauteur de chute, représentant le travail moteur, est égal, avons-nous dit, au travail résistant. Or, celui-ci est constitué par la résistance de l'air contre le mobile multipliée par l'espace que ce mobile a parcouru dans l'unité de temps. Il suffit donc de mesurer cet espace parcouru, et de diviser par sa valeur le travail résistant que l'on connaît déjà, pour obtenir la résistance que l'air oppose, à chaque instant, au déplacement du mobile.

Mais, comment doit-on considérer cette résistance totale qu'un mobile rencontre quand il se déplace dans l'air? L'analogie fait supposer que les choses se passent à peu près de même dans tous les fluides, et l'on considére la résistance, dans l'air aussi bien que dans l'eau, comme formée, d'un côté par une pression augmentée en avant du mobile, c'est-à-dire dans le sens de la marche, et de l'autre côté, par une pression diminuée en arrière. La différence des deux pressions constituerait donc la résistance totale que le mobile éprouve.

Pour bien comprendre le rôle de ces deux influences de signes contraires qui s'ajoutent pour constituer la résistance au déplacement des mobiles dans l'air, considérons un plan mince : un disque léger, verticalement suspendu ; il restera immobile dans l'air, parce que ce fluide exerce une égale pression sur ses deux faces. Mais admettons qu'on augmente la pression de l'air sur la face antérieure de ce disque, ou qu'on la diminue sur la face postérieure ; dans les deux cas, le disque se déplacera en arrière ; seulement, l'énergie du déplacement sera double si les deux changements de pression se produisent à la fois. Or, cette force qui déplace le disque, dans le cas idéal que nous considérons ici, est identique à celle qui constitue la résistance à son mouvement dans l'air.

Si la pression positive était la même sur tous les points de la face antérieure du disque, et si cette égalité existait aussi pour la pression négative, en tous les points de la face postérieure, il suffirait, pour estimer la résistance que l'air oppose au déplacement du disque, de mesurer la différence des pressions en un point de chacune des deux faces, et de multiplier cette différence par la surface entière. C'est ainsi qu'on estime la pression totale qu'un volume d'eau exerce sur le fond d'un réservoir, en multipliant la pression mesurée en un seul point par la surface tout entière.

Mais les choses ne se passent pas d'une manière aussi simple dans les conditions dynamiques où se produit la résistance de l'air au mouvement des corps. Sur les bords du disque, la pression, positive en avant, s'élève moins haut que dans les parties plus centrales ; en arrière, la pression négative descend moins bas sur les bords qu'au centre. Dans toute cette région marginale, l'air passe assez facilement d'un côté à l'autre du

corps en mouvement, ce qui constitue un déchet dans la résistance.

Mais, par cela même que ces mouvements de l'air ne se produisent que sur la circonférence d'un disque en mouvement, la diminution de résistance qu'ils amènent se fait d'autant moins sentir que la surface du disque employé est plus étendue. Pour de très-grandes surfaces, cette influence serait négligeable, et l'on pourrait estimer assez exactement la résistance que leur mouvement éprouve dans l'air, d'après les différences de pression observées au centre des deux faces opposées.

Ce moyen d'estimer la résistance de l'air rendrait, s'il était légitime, les plus grands services à l'expérimentation physiologique; il permettrait d'explorer, au moyen d'appareils manométriques, la pression de l'air en différents points du corps ou des ailes d'un oiseau, pendant les mouvements du vol. La physique elle-même profiterait de l'emploi de cette exploration manométrique des pressions de l'air au devant des corps en mouvement. On pourrait savoir jusqu'à quelle distance s'étendent ces compressions et ces raréfactions de l'air autour des mobiles animés de vitesse qu'on se représente, assez vaguement, comme poussant devant eux une sorte de *proue* d'air plus ou moins comprimé et laissant derrière eux un sillage d'air raréfié dans lequel se forment des espèces de *remous*.

J'ai tenté, il y a trois ans, de faire ainsi des explorations manométriques de la pression de l'air, en avant et en arrière de corps animés d'un mouvement de translation uniforme. Je reconnus qu'en effet, on peut constater, au devant d'un disque en mouvement, une couche d'air comprimé dont la densité croit à mesure qu'on explore un point plus rapproché du disque; qu'en arrière, au contraire, la pression de l'air est diminuée, et que cette pression, minimum au contact de la face postérieure, se relève peu à peu à mesure qu'on porte l'exploration manométrique plus loin en arrière du disque. L'imperfection des appareils dont je disposais m'a empêché de déterminer la forme et l'étendue des points où la pression est ainsi modifiée dans le voisinage du corps en mouvement.

Je rappellerai ces premières expériences parce qu'elles m'ont livré un résultat assez imprévu, à savoir : que le tube manométrique, tournant autour de l'axe du manége, est le siége d'une

aspiration produite par la force centrifuge, et que cette aspiration dissimule entièrement la pression positive à laquelle l'air est soumis dans les points qui sont en contact avec la face antérieure du disque.

I. — Exploration de la pression de l'air en avant et en arrière d'un disque animé d'un mouvement rotatif.

Il s'agissait, dans ces expériences, d'obtenir la rotation d'un disque avec une vitesse uniforme; d'établir un tube, tournant avec le disque lui-même, de façon que son extrémité ouverte plongeât dans l'air comprimé ou raréfié dont on voulait explorer la pression; enfin de conduire ce tube jusqu'à un manomètre assez sensible pour indiquer la pression de l'air au point exploré.

Disposition des appareils. — La figure 107 représente, dans son ensemble, l'appareil qui fut établi pour ces recherches préliminaires.

Cet appareil se compose de trois parties distinctes : 1° d'un moteur H, aussi uniforme que possible; 2° d'un plan tournant P, qui est entraîné par l'appareil moteur; 3° d'un manomètre très-sensible M, auquel un tube d'une longueur suffisante apporte la pression de l'air explorée en un point quelconque du plan tournant.

Le moteur H (fig. 107) est un mouvement d'horlogerie solidement construit et mis en action par un poids; un régulateur de Foucault *r* assure l'uniformité du mouvement de cet appareil. Une courroie sans fin transmet le mouvement du moteur au plan tournant P dont la disposition va être décrite.

La figure 108 représente, dans leurs détails, le plan tournant et le tube manométrique à l'aide duquel on explore la pression de l'air dans le voisinage de ce plan. P est un disque de bois mince de 10 centimètres de rayon, articulé à la branche verticale d'un cadre métallique dont l'axe central forme un des côtés; cet axe central, actionné par la poulie *p*, tourne et entraîne avec lui le cadre et le disque P dont le centre parcourt la trajectoire indiquée par une ligne ponctuée et se meut dans le sens des flèches. (Pour empêcher les mouvements de laté-

ralité qui se produiraient pendant la rotation, le cadre et le disque sont équilibrés par un contre-poids C qui tourne avec eux.)

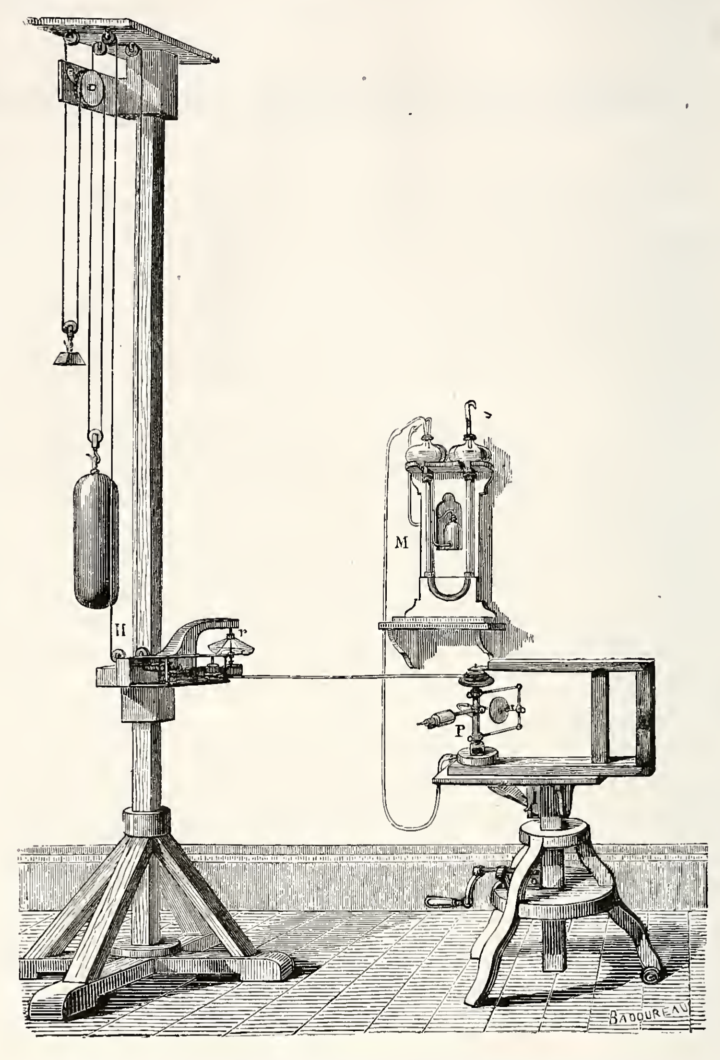


Fig. 107. — Vue d'ensemble du moteur H, du plan tournant P, des tubes manométriques et du manomètre M.

Le tube manométrique est représenté en m; son extrémité libre est appliquée en face du centre du disque où il doit

explorer la pression. Mais, comme on doit faire de pareilles explorations en tous les points de la surface du disque, sur ses différentes faces et à différentes distances de sa surface, on a donné au tube des articulations multiples qui lui permettent de s'allonger ou de se raccourcir, de s'élever ou de s'abaisser, enfin, de se porter à volonté sur l'une ou l'autre face du disque.

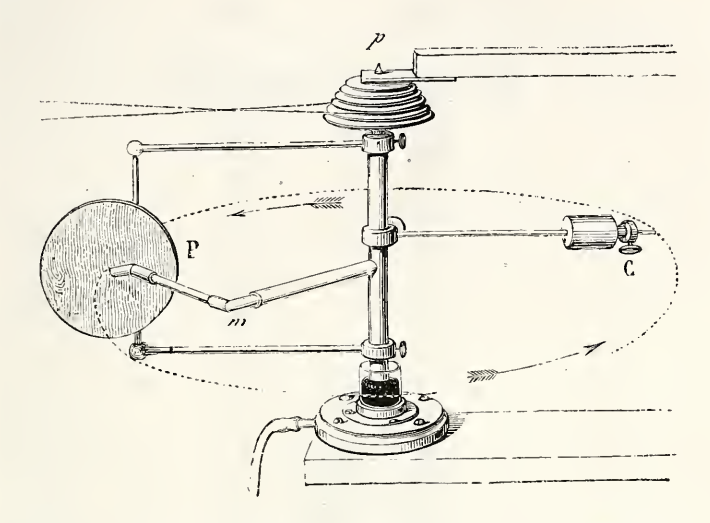


Fig. 108. — Détails de construction du plan tournant P et du tube manométrique *m*.

La pression de l'air dans lequel plonge l'extrémité du tube manométrique doit se transmettre, par une série de conduits hermétiquement clos, jusqu'au manomètre (représenté en M dans la figure 107) ; pour cela, le tube *m* communique avec l'intérieur de l'axe central qui est creux. Celui-ci est fermé par en haut, du côté de la poulie motrice, tandis que, par en bas, il plonge et pivote dans un godet plein de mercure. Mais, du centre du mercure s'élève un autre tube qui s'ouvre au-dessus du niveau du liquide, à l'intérieur de l'axe. Ce tube intérieur se rend par le pied de l'appareil à un conduit de caoutchouc long de 2 ou 3 mètres, qui aboutit finalement au manomètre indicateur de la pression.

La pression s'établit donc nécessairement entre le manomètre et l'air dans lequel plonge l'extrémité du tube explorateur. A moins d'avoir à sa disposition un moteur d'une grande puis-

sance, il faut employer un manomètre d'une extrême sensibilité, car les variations de pression auxquelles nous aurons

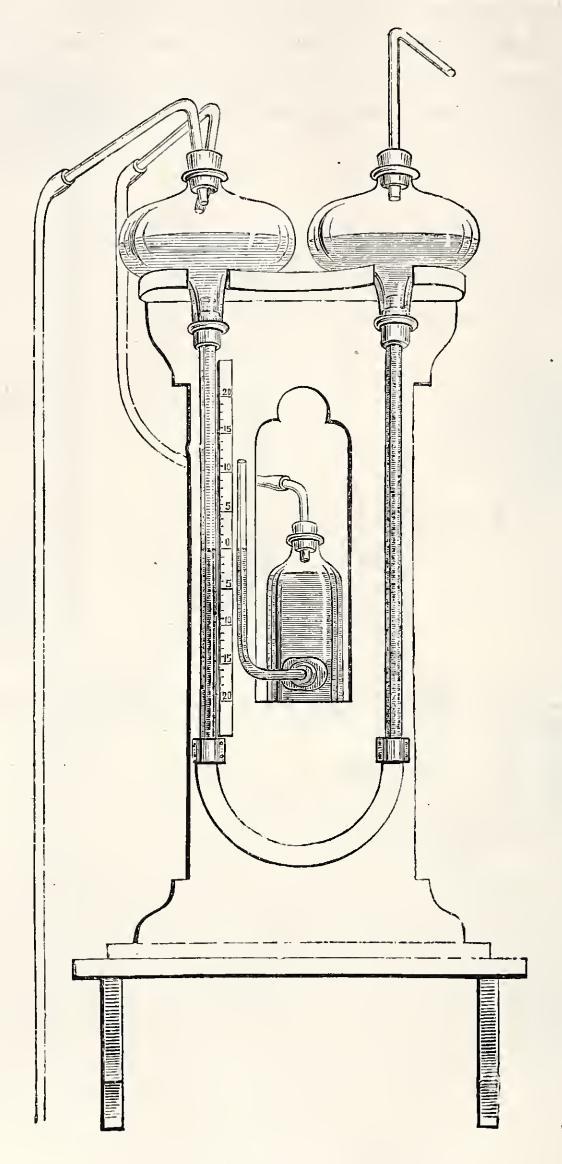


Fig. 103. — Manomètre à deux liquides.

affaire seront peu considérables. A cet effet, j'ai choisi le manomètre de Kretz et de Mondésir, à deux liquides; cet instru-

ment amplifie environ 30 fois les indications du manomètre à eau, soit plus de 400 fois celles du manomètre à mercure.

Dans la figure 109, on voit avec tous ses détails le manomètre de Kretz déjà représenté en M dans la figure 107.

Deux boules de grand diamètre, cylindriques à leur partie moyenne, au point d'affleurement des liquides de l'appareil, sont réunies en bas par un long tube en U qui établit la communication entre elles. Dans l'une des boules, on a versé de l'essence de térébenthine ; dans l'autre, de l'alcool coloré. Ces deux liquides arrivent au contact sans se mélanger, et la ligne de démarcation de leurs niveaux reste très-nette, l'essence surnageant au-dessus de l'alcool.

On règle le niveau des deux liquides dans les boules, de façon à amener le point de contact des liquides diversement colorés à la partie moyenne de la branche du tube de verre où se trouve une échelle graduée, puis, au niveau de cette jonction des deux liquides, on marque le zéro de l'appareil.

Le tube qui amène la pression dans le manomètre s'ouvre dans le bouchon de la boule qui contient l'essence de térébenthine ; une bifurcation de ce tube se rend dans un manomètre à eau visible, dans la figure 109, au centre du manomètre.

Cette disposition permet de contrôler la sensibilité de l'appareil. En effet, supposons qu'en soufflant dans le tube de transmission, on ait élevé d'un centimètre le niveau du manomètre à eau ; on regarde alors le déplacement de la ligne de séparation des deux liquides dans le manomètre de Kretz et de Mondésir, et l'on voit combien cette ligne s'est déplacée. Nous avons dit que ce déplacement serait en ce cas d'environ 30 centimètres.

Voici, en quelques mots, la théorie de cet instrument et de ses indications amplifiées.

Considérons les niveaux des deux liquides dans les boules de l'appareil. Au repos, ces niveaux sont sensiblement sur un même plan ; qu'une pression s'exerce sur l'essence de térébenthine, de façon à faire équilibre à une colonne de liquide d'un centimètre : un dénivellement se produira dans les deux boules et le liquide s'élèvera d'un centimètre du côté de l'alcool.

Mais, grâce au diamètre considérable des boules, ce léger

changement de niveau représente le passage d'une quantité considérable de liquide d'une boule dans l'autre à travers le tube de verre qui les réunit. Et comme ce tube est d'un faible calibre, il s'ensuit que si l'œil pouvait y suivre le trajet d'une tranche de liquide, il la verrait parcourir un chemin considérable. Or, la ligne de démarcation des deux liquides, dont l'un est rouge et l'autre blanc, rend perceptible le parcours de cette tranche idéale dont nous parlions tout à l'heure.

Dans la disposition actuelle de l'appareil, cette tranche s'abaisse lorsqu'il s'exerce, sur le niveau de l'essence, une pression positive; elle s'élève dans le cas de pression négative ou d'aspiration produite dans cette même boule du manomètre.

Une remarque toutefois doit être faite : c'est que, dans le cas où il se produit un déplacement du niveau du manomètre, l'essence se substitue à l'alcool, ou l'alcool à l'essence, dans une certaine étendue du tube ; il y a donc substitution d'une colonne d'un liquide plus léger à une colonne d'un liquide plus dense, ou inversement.

Dans ces deux cas, les indications de l'instrument sont un peu diminuées ; mais, telles qu'elles sont, elles suffisent entièrement aux expériences dont il va être question.

EXPÉRIENCE Ire. — *Aspiration produite sur le manomètre par la force centrifuge due à la rotation du tube explorateur.* — Lorsqu'un fluide, de l'eau, par exemple, est contenu dans un tube que l'on fait tourner rapidement, la force centrifuge projette cette eau et la lance à distance. Un effet analogue se produit quand le tube qui tourne est rempli d'air ; celui-ci est partiellement expulsé par la force centrifuge, et il se produit dans le tube une aspiration dont on peut vérifier l'existence au moyen de l'expérience suivante :

Supprimons le disque P de la fig. 2, et ne laissant que le tube manométrique dont l'ouverture est tournée extérieurement, c'est-à-dire suivant le prolongement du rayon , faisons tourner l'appareil. Aussitôt le manomètre se met en marche ; il s'arrête bientôt en indiquant une aspiration de 10 centimètres par exemple (au manomètre de Kretz et de Mondésir, ce qui équivaut à 1/3 de centimètre d'eau).

Cette aspiration est produite, comme nous venons de le dire, par la force centrifuge ; on la voit en effet s'accroître très-rapidement quand la vitesse augmente ; elle varie également quand on change la longueur du tube manométrique. Si cette *aspiration centrifuge*, comme nous l'appellerons désormais pour la désigner brièvement, tient à la vitesse même de la rotation du tube manométrique, nous devrons toujours la retrouver, quelle que soit la position de l'ouverture du tube, et nous devrons en tenir compte dans toutes les évaluations de la pression de l'air au voisinage du disque. Cette aspiration neutralisera donc, en totalité ou en partie, les pressions positives de l'air exploré ; elle exagérera au contraire les indications des pressions négatives.

EXPÉRIENCE II. — *Mesure de la pression positive de l'air au devant du disque tournant.* — Si l'on place le tube *m* au contact du centre du disque et à sa partie antérieure, de manière à explorer la pression de l'air en ce point, pendant la rotation, on s'aperçoit que le manomètre reste immobile, et qu'il marque toujours zéro, c'est-à-dire la pression atmosphérique normale, quelle que soit la vitesse du mouvement. Or on sait, par l'expérience précédente, que la force centrifuge produit dans le tube du manomètre une aspiration assez forte. Cette aspiration se produirait dans l'expérience présente, s'il n'existait au-devant du disque une pression positive égale et contraire à cette aspiration qu'elle neutralise entièrement (1).

Dans tous les points de la surface du disque, l'exploration donne le même résultat : le manomètre reste fixé à zéro. Comme cette exploration exige des allongements et des raccourcissements du tube manométrique, l'intensité de l'aspiration centrifuge devra varier avec la longueur de ce tube, et comme l'égalité de pression se maintient pour tous les points explorés, on peut conclure qu'à la surface du disque tournant,

(1) Cette égalité singulière me sembla d'abord tenir à un hasard de l'expérience ; je ne pensais pas qu'elle existât pour toutes les vitesses de rotation et quel que fût le rayon du cercle parcouru. Mais je reconnus plus tard que cette égalité existe toujours, de sorte que la force centrifuge toute seule suffit pour dissimuler la pression de l'air contre un plan qui se meut d'un mouvement rotatif.

la pression positive croît du côté de la convexité du cercle parcouru et décroît du côté de la concavité de ce cercle.

Au lieu d'explorer la tranche la plus voisine du disque, si l'on s'adresse à des régions de plus en plus éloignées de celui-ci, on voit que le manomère indique des aspirations de plus en plus énergiques à mesure qu'on s'éloigne davantage. Cela prouve que la pression positive est de moins en moins considérable et qu'elle neutralise de moins en moins l'aspiration centrifuge. A un certain degré d'éloignement du disque, on retrouve la force centrifuge tout entière, c'est-à-dire avec la même valeur que dans les points les plus éloignés du disque tournant (1). Ce point correspond à la limite antérieure de la région où l'air est comprimé. On peut constater, au moyen d'autres explorations, qu'en face des points du disque qui s'éloignent davantage du centre, la pression positive diminue plus rapidement qu'en face du centre. On pourrait ainsi déterminer la forme de l'espace où l'air est comprimé devant le disque, et assigner, pour les différents points de ce demi-ovoide irrégulier, la forme des couches concentriques de même pression. Mais cette détermination qui nécessite l'emploi d'un appareil moteur d'une uniformité parfaite et d'une marche très-longue ne m'a pas été possible avec les moyens dont je disposais.

Expérience III. — *De la pression négative en arrière du plan tournant.* — S'il est vrai que, derrière un mobile animé de translation, il existe une pression diminuée, en plaçant l'extrémité du tube explorateur *m* en arrière du plan P, on en doit obtenir l'indication sous forme d'aspiration signalée par le manomètre. Cette fois, l'effet produit par le plan étant le même que celui de la force centrifuge, c'est-à-dire consistant en une aspiration, on devra voir le niveau du manomètre accuser une pression plus basse que sous l'influence de la force centrifuge toute seule.

C'est en effet ce qui arrive. Dans une série d'expériences, j'ai vu que l'aspiration signalée dans ces conditions est sensiblement double de celle que la force centrifuge toute seule

(1) Cette distance m'a semblé correspondre à un peu plus du diamètre du disque; elle semble du reste varier avec la vitesse de rotation.

fournissait, avec la même vitesse de rotation. L'égalité de ces deux aspirations entre elles ne m'a pas toujours paru absolue ; mais cela tient peut-être à la difficulté de placer dans mon appareil l'extrémité du tube explorateur au centre de la face postérieure du plan P. Toutefois, dans un certain nombre d'expériences faites dans le laboratoire de M. Jamin, avec un moteur à gaz qui me permettait de renverser au besoin le sens de la rotation de la plaque, j'ai constaté que l'aspiration de la force centrifuge et celle qui se produisait derrière la plaque tournante étaient très-sensiblement égales entre elles.

Cette première série d'expériences montre qu'avec des appareils à marche prolongée et à mouvement uniforme, il sera très-facile de déterminer l'état de la pression dans tous les points où elle est modifiée par le voisinage d'un disque tournant. On pourra également déterminer l'étendue de cet espace où la pression est modifiée, et voir dans quel rapport il varie avec la vitesse du mouvement rotatif.

Enfin, on pourra déterminer, pour chaque vitesse de rotation, l'étendue de la zone marginale où l'air cesse d'être soumis à la même pression que dans les parties plus centrales du disque.

Mais un fait beaucoup plus important résulte de ces expériences : c'est l'égalité qui existe entre la pression positive ou négative de l'air, en un point du disque tournant, et l'aspiration centrifuge qui se produit dans un tube tournant avec la même vitesse que le plan, et ayant pour longueur la distance qui s'étend entre le centre de rotation et le point exploré de la surface du disque. Si cette égalité se vérifie dans les expériences ultérieures, on aura le droit de substituer la mesure de l'aspiration centrifuge à celle de la pression, ce qui, dans certains cas, constituera une simplification très-avantageuse (1).

(1) Lors de la rédaction de ce mémoire, j'ignorais que le même résultat eût été obtenu par Athanase Dupré au moyen d'appareils tout différents de ceux que j'ai employés. On lit dans l'ouvrage de cet auteur intitulé : *Théorie mécanique de la chaleur*, p. 441 : « La pression produite par la force centrifuge seule (dans un tube rayon) est moyenne proportionnelle entre les pressions produites par le mouvement en arrière et par le mouvement en avant. » L'auteur a tiré de ses expériences des mesures de la résistance de

II. — **Preuves de l'égalité entre l'aspiration centrifuge et les changements de pression à la surface d'un mobile.**

1° *Détermination de cette égalité.* — Dans cette nouvelle série d'expériences, j'ai supprimé l'emploi du disque tournant et j'ai employé simultanément trois tubes manométriques, sortes de tubes de Pitot dont les ouvertures étaient différemment orientées.

L'un de ces tubes, celui qui, dans la figure 4, est au milieu,

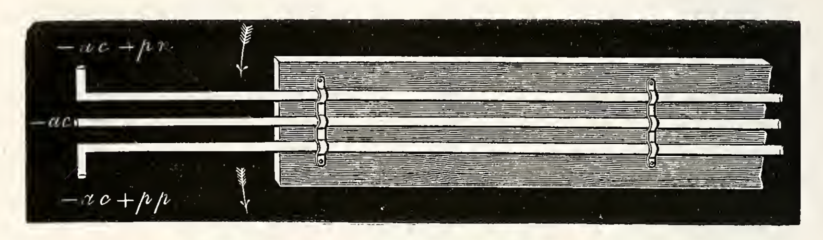


Fig. 110. — Extrémités des tubes manométriques disposés sur une planchette qui forme le bras d'un manége tournant de 3 mètres de rayon. Des flèches indiquent le sens de la rotation.

s'ouvrait suivant le prolongement du rayon du cercle parcouru ; l'autre se courbait pour présenter son ouverture dans le sens du mouvement rotatif ; le troisième, courbé en sens inverse, s'ouvrait en arrière par rapport au sens de la rotation.

Le premier tube devait être soumis à *l'aspiration centrifuge* — *ac* toute seule. Le tube ouvert en avant devait éprouver à la fois les effets de la force centrifuge et ceux de la *pression positive* qui s'exercerait contre son ouverture ; celle-ci devait comprimer l'air à l'intérieur du tube jusqu'à ce qu'elle se trouvât en équilibre avec la force antagoniste : je représenterai ces deux forces contraires par les signes — *ac* + *pp*. Enfin, le tube ouvert en arrière devait être soumis à la fois à deux influences de même sens : l'*aspiration centrifuge ac*, et

l'air pour une série de vitesses bien supérieures à celles que j'ai pu atteindre. Aussi n'aurais-je pas publié le présent travail, si je n'avais cru utile de montrer comment la méthode graphique peut être appliquée à des expériences sur ce sujet et combien elle peut rendre précises les mesures de vitesse et de pression.

cette *pression négative pn* que nous avons déjà vue se produire en arrière d'un plan tournant. Nous désignerons ces forces de même signe par — *ac* et — *pn*.

Ces prévisions furent entièrement vérifiées, et j'obtins, pendant la rotation de l'appareil, une certaine valeur pour l'aspiration centrifuge — *ac ;* il n'y eut aucun mouvement dans le manomètre qui correspondait au tube ouvert en avant, de sorte que, suivant les prévisions, $-ac+pp=0$. Enfin, le tube ouvert en arrière donna une pression négative double de $-ac$, de sorte que $-pn=-ac$.

Pour constater ces résultats, je me servis de la méthode graphique. Trois appareils manométriques enregistreurs écrivaient à la fois l'état de la pression dans chacun des tubes. Je dois, en quelques mots, décrire la disposition de ces appareils manométriques. Ce sont les *tambours à leviers* qui m'ont déjà servi dans beaucoup d'autres circonstances (1) ; seulement je les ai sensibilisés pour les besoins de l'expérience présente.

Qu'on imagine une large cuvette de métal fermée par en haut au moyen d'une mince membrane de caoutchouc. Cette cuvette est percée au fond d'un orifice d'entrée dans lequel vient s'ouvrir le tube manométrique.

L'air foulé sous une certaine pression dans l'intérieur de la cuvette soulèvera la membrane à une certaine hauteur, tandis que l'air aspiré par le tube produira un enfoncement de cette membrane. Ces mouvements, transmis par un levier muni d'un style, sont amplifiés et enregistrés sur un cylindre couvert de papier noirci à la fumée. Plus la pression positive sera forte, plus le soulèvement du levier sera grand, plus l'aspiration par le tube manométrique sera énergique, plus l'abaissement de la membrane sera considérable ; ce qui se traduira par un abaissement de la ligne tracée.

Mais les indications de ce manomètre enregistreur sont arbitraires ; il faut les rapporter à celles d'un manomètre étalon. J'ai donc construit, pour chacun des instruments que j'employais, une échelle graduée d'après un manomètre à eau.

(1) Voyez, pour la description détaillée de ces instruments : *Du mouvement dans les fonctions de la vie*, p. 148. Paris, 1868, G. Baillière.

La figure 111 montre l'échelle d'un manomètre enregistreur construite pour les pressions négatives. Chacune des divisions correspond à *un millimètre d'eau.*



FIG. 111. — Échelle des indications du manomètre inscripteur pour les pressions négatives.

On remarquera, dans cette échelle, une décroissance assez régulière des degrés de la pression négative, à mesure qu'on s'éloigne du zéro. Cela tient à ce que la membrane de caoutchouc, lorsqu'elle s'affaisse sous l'influence d'une pression diminuée à l'intérieur de l'appareil, prend une force élastique de plus en plus grande, à mesure qu'elle est plus écartée de sa position de repos qui correspond au zéro de l'échelle.

Il faut avoir soin de graduer l'appareil manométrique très-près du moment de l'expérience, pour être sûr qu'aucune altération de la membrane de caoutchouc n'a pu altérer la sensibilité de l'instrument (1).

A l'appui des résultats que nous avons signalés tout à l'heure, voici (fig. 112) les tracés qu'a fournis l'une des expériences :

Il me semble peu utile de décrire, dans tous ses détails, l'appareil rotatif qui a servi à ces expériences (2). Il suffira de dire qu'il consistait en un manége de bois léger établi sur un bâti solide autour duquel il pivotait. Les bras du manége, longs de 3 mètres, portaient les tubes manométriques qui s'ouvraient à leur extrémité, comme cela se voit figure 4, tandis que tout près du centre étaient les manomètres eux-mêmes qui tournaient avec le manége et traçaient sur un cylindre immobile verticalement placé sur l'axe du manége.

Pour tracer la ligne de zéro, à chaque expérience, on faisait faire un tour au manége après avoir rompu la continuité des tubes manométriques, afin de supprimer toute influence sur les appareils enregistreurs. — Pour tracer l'indication de la pression qui se produit, pendant le mouvement rotatif, sur

(1) Cette précaution est peut-être exagérée, car j'ai construit, à plusieurs semaines d'intervalle, des échelles de graduation qui se sont trouvées concordantes.

(2) Voyez, pour la description de l'appareil, mes expériences sur le vol des oiseaux, avec figures (*la Machine animale*; Paris, 1873).

chacun des tubes, on rétablissait la continuité de ceux-ci, et quand on avait atteint une vitesse de rotation uniforme, on amenait les styles écrivant au contact du cylindre au moyen d'une action électro-magnétique.

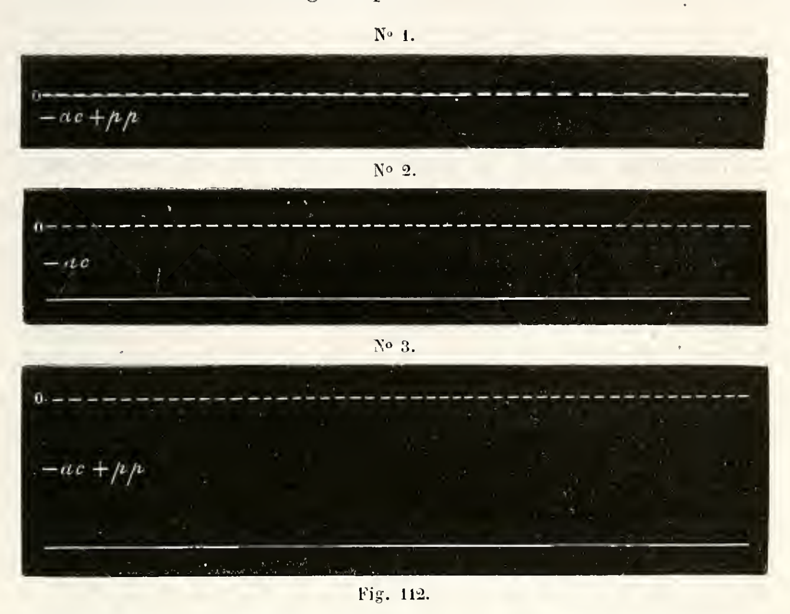


Fig. 112.

Graphique n° 1. — Indication du tube manométrique dont le bec est tourné en avant; il reste à zéro pendant la rotation de l'appareil.

Graphique n° 2. — L'appareil accuse, pendant la rotation, une pression négative : c'est la mesure de l'aspiration centrifuge; elle est fournie par le tube qui s'ouvre suivant le prolongement du rayon.

Graphique n° 3. — L'appareil accuse une très-forte pression négative; cette indication est fournie par le manomètre dont le tube est tourné en arrière.

2° *Dangers de l'entraînement de l'air par les appareils rotatifs.* — On a vu, dans le graphique n° 1, que le tracé qui correspond à l'indication du manomètre ouvert en avant se confond exactement avec la ligne du zéro. Dans certaines expériences de rotation très-rapide (le bec du manomètre parcourant environ 14 mètres par seconde), j'ai constaté un dédoublement de cette ligne (fig. 113), de telle sorte que, pendant la rotation, le style écrivait un peu au-dessous de zéro, accusant une légère pression négative qui équivalait à un peu moins d'un millimètre d'eau. Je ne savais d'abord comment expliquer ce phénomène, qui était très-inconstant.

Mais je crus remarquer qu'il se produisait surtout lorsque

la rotation du manége avait été très-longtemps prolongée. Je supposai, alors, que l'entraînement de l'air devait produire cette diminution de la pression positive dans le tube ouvert en avant. Cette pression positive, étant diminuée, ne neutra-



Fig. 113. — Tracé fourni par le tube nº 1 (fig. 6) lorsque l'air de la salle est entraîné par la rotation prolongée du manége.

lisait plus complétement l'aspiration due à la force centrifuge qui, dès lors, se manifestait partiellement. Il est bien évident que si l'air de la salle est entraîné par le manége, le bec des tubes ne possède plus, par rapport à cet air, qu'une vitesse relative moindre que celle que le manége possède réellement et qui produit l'aspiration centrifuge.

Si cette interprétation était vraie, on devrait constater un effet analogue du côté du manomètre, dont le tube s'ouvrait en arrière. Or cette influence existait réellement; la pression négative y était moindre que dans les conditions normales; elle n'atteignait plus le double de l'aspiration centrifuge.

Mais je voulais acquérir la démonstration de l'entraînement de l'air dans les cas où les indications manométriques présentaient l'irrégularité que je viens de signaler. Pour cela, je plaçai la flamme d'une bougie en un point de la circonférence parcourue par le manége. Les extrémités des tubes manométriques passaient, à chaque fois, très-près de la flamme, qui subissait une déviation de très-courte durée à chacun de ces passages. Mais, quand le manége tournait depuis quelques instants, la flamme de la bougie prenait une déviation permanente qui la portait en dehors du cercle parcouru et dans le sens du mouvement rotatif. Cette déviation se produisait lentement quand la vitesse n'excédait pas 5 ou 6 mètres par seconde; elle exigeait alors pour se montrer 20 à 30 secondes de rotation. Mais, pour les vitesses qui atteignaient et dépassaient 10 mètres, la déviation de la flamme arrivait au bout de 5 ou 6 secondes et allait toujours en croissant.

Dès lors, le moyen d'empêcher l'entraînement de l'air et ses

effets nuisibles à l'estimation des pressions était tout simplement d'imprimer, du premier coup, la rotation au manége et d'enregistrer tout de suite la pression, dans les cas où l'on voulait étudier les effets d'une rotation rapide. En employant ces précautions, je vis cesser toutes les incohérences qui avaient altéré quelques-uns de mes résultats.

3° *Mesure des pressions positives et négatives d'après l'aspiration centrifuge. Application à la théorie de la résistance de l'air.* — Les relations constantes qui existent entre l'aspiration centrifuge fournie par le tube manométrique ouvert suivant le rayon du manége prolongé, et les pressions positives ou négatives fournies par les deux autres tubes, permettent de simplifier encore les conditions de l'expérience. Il suffira en effet de faire tourner le tube à aspiration centrifuge tout seul, pour déduire du tracé manométrique correspondant la valeur des pressions que signaleraient les deux autres manomètres. Bien plus, cette méthode est préférable, puisqu'il est évident que le tube à aspiration centrifuge est à l'abri de toute influence perturbatrice de l'entraînement de l'air.

Or, on a vu, dans les expériences de la première série, que l'aspiration centrifuge est égale aux pressions positives et négatives qui se produisent en avant et en arrière d'un plan tournant. On pourra donc, d'après l'aspiration centrifuge toute seule, déduire les pressions inverses qui s'observeraient sur les deux faces opposées de ce plan. En prenant deux fois la valeur de l'aspiration centrifuge, on aura la somme de ces deux pressions inverses qui agissent sur chaque élément de surface pour en retarder la translation. Enfin, si l'on multiplie, par la surface tout entière, cette résistance qui s'oppose au mouvement de chaque point, on devra obtenir la valeur de la résistance de l'air contre un plan tournant avec une vitesse déterminée.

Le rapport de la résistance de l'air à la vitesse du mouvement est le point intéressant à étudier ; il faudra donc introduire dans l'expérimentation un élément de plus : la détermination rigoureuse de la vitesse du mouvement rotatif du tube manométrique à aspiration centrifuge.

La physique moderne s'est enrichie de méthodes très-pré-

cises pour l'estimation du temps ; la *chronographie* peut, avec certaines modifications, se prêter très-bien à la mesure exacte des vitesses, ainsi qu'on va le voir dans le paragraphe suivant.

III. — Mesures graphiques de la vitesse du mouvement de translation dans l'air.

La connaissance d'une vitesse suppose la double notion de l'espace parcouru et du temps employé à le parcourir.

A) *Mesure des espaces parcourus.* — Pour mesurer l'espace parcouru, j'ai employé le moyen suivant. Les appareils enregistreurs qui tracent l'indication de la pression se transportent, avons-nous dit, avec le manége tout entier, tandis que le cylindre qui reçoit le tracé est immobile au-dessus de l'axe central. Il suit de là que la pointe écrivante décrit autour du cylindre un arc de cercle du même nombre de degrés que l'extrémité du manége qui porte les tubes manométriques. La longueur de la ligne tracée sur le cylindre sera donc dans un rapport constant avec l'espace parcouru par l'extrémité des tubes manométriques ; ce rapport sera celui du rayon du cylindre au rayon du manége. Dans mon appareil, le cylindre a $0^{m},06$ de rayon, tandis que le rayon du manége est de 3 mètres ; le rapport est 1/50. Ainsi, lorsque l'on comptera sur le cylindre une longueur d'un centimètre occupée par un tracé, on saura que, pendant que cette ligne s'inscrivait, l'extrémité des tubes manométriques parcourait un espace de 50 centimètres. Reste à mesurer le temps employé par le manége pour parcourir cet espace.

B) *De la mesure du temps au moyen d'un nouveau chronographe.* — Depuis que Thomas Young a introduit, en physique, l'emploi de verges vibrantes, et Duhamel l'usage du diapason inscripteur pour la mesure des intervalles de temps très-courts, cette méthode chronographique a pris une extension considérable. J'ai cherché moi-même à l'introduire en physiologie, où elle semble appelée à rendre de grands services. Mais, l'emploi direct du diapason n'est pas toujours facile ; souvent même il est impossible, soit à cause du

volume encombrant, soit à cause du poids de cet appareil.

Ainsi, dans l'expérience qui nous occupe, il s'agit d'avoir un style, vibrant cent fois par seconde, qui vienne tracer ses vibrations à côté des lignes qui expriment l'état de la pression dans chacun des manomètres. J'ai réussi à obtenir cette inscription du temps au moyen du chronographe qui sera décrit tout à l'heure. Voici un spécimen des tracés ainsi obtenus (fig. 114).

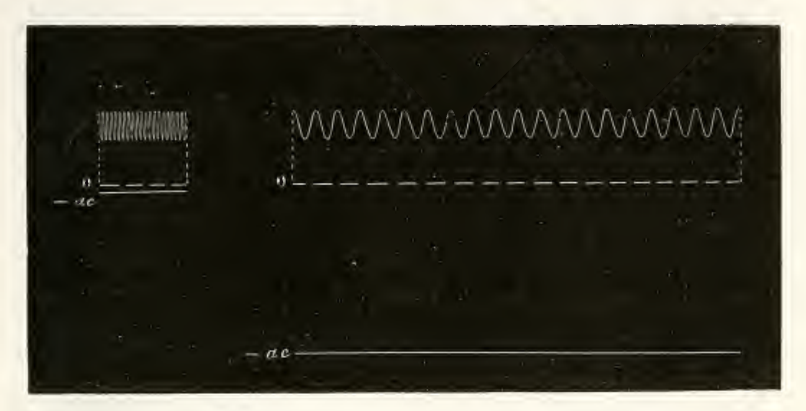


Fig. 114. — Tracés de l'aspiration centrifuge — *ac*, avec deux vitesses différentes de rotation du manége. Les courbes sinueuses inscrites en haut de ces tracés sont fournies par le chronographe et servent à mesurer la vitesse de rotation. On n'a représenté que la longueur qui correspond à 1/5ᵉ de seconde.

Dans cette figure qui représente la valeur de l'aspiration centrifuge pour une rotation très-lente (à gauche de la figure), et pour une rotation rapide (à droite), on voit également inscrits les tracés du chronographe qui donne cent vibrations doubles par seconde. Or, suivant la vitesse de rotation de la machine, ces vibrations occuperont des espaces bien différents. Si nous comptons, par exemple, vingt vibrations sur chacun des deux graphiques, ce qui correspond, dans les deux cas, à 1/5ᵉ de seconde, nous verrons que ce même espace de temps correspond, dans le premier graphique à un centimètre, et dans le deuxième à 6 centimètres. Quand le chronographe est adapté avec les manomètres inscripteurs sur le manége, on se sert de frotteurs pour le mettre en communication électrique avec la pile, malgré le mouvement de rotation du système.

Comme les espaces mesurés sur le cylindre sont cinquante fois plus petits que les espaces parcourus par les extrémités des tubes manométriques, nous saurons que dans 1/5e de seconde l'espace parcouru dans le premier cas était de 50 centimètres, et dans le second de 3 mètres. Enfin, dans une seconde entière, les espaces parcourus dans les deux cas étaient de 2m,50 et de 15 mètres, ce qui est la mesure des vitesses de rotation.

Voici la description du chronographe qui m'a servi :

Un style de bois léger, terminé par une pointe très-fine, est représenté dans la figure 9 traçant sur un cylindre enfumé. Comme les vibrations doivent se répéter cent fois par seconde, il faut donner au style une disposition telle que ses vibrations propres aient précisément ce même nombre. A cet effet, on place à la base du style une lame de ressort d'acier, dont une vis de réglage permet de varier la longueur. On règle l'appareil de façon que le style, quand on le fait vibrer, donne cent oscillations par seconde. Reste à entretenir ces mouve-

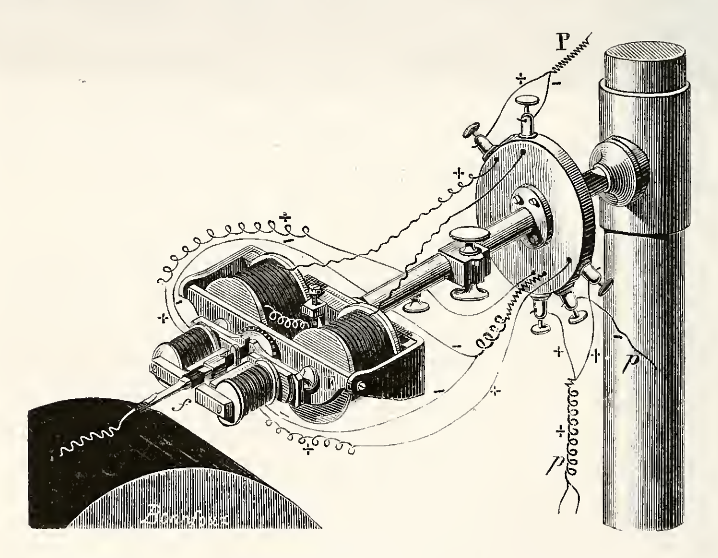


Fig. 115. — Chronographe inscrivant cent vibrations par seconde.

ments d'une manière permanente ; pour cela on se sert de l'électricité.

Une virole de fer doux entoure le style à sa partie moyenne ;

c'est sur cette virole qu'agiront tour à tour deux bobines électro-magnétiques. La figure montre le style F entre les deux bobines qui l'influencent. Il s'agit de lancer tour à tour dans chacune de ces deux bobines un courant électrique qui durera un demi-centième de seconde. De cette façon, à chaque centième de seconde, le style se portera dans deux directions opposées, c'est-à-dire exécutera une oscillation double.

L'envoi alternatif des courants dans les deux bobines se fait au moyen d'un diapason de cent vibrations doubles, disposé de la manière suivante :

Sur une table (fig. 116) sont représentées les pièces nécessaires à cette transmission électrique. C'est, d'une part, une petite pile de Grenet, dont l'un des fils se rend à un diapason, par le manche duquel le courant pénètre. De là, le flux électrique se continue par une des branches du diapason et par le ressort frotteur qui la termine. Or ce ressort, pendant la vibration du diapason, passe alternativement sur deux contacts de platine isolés l'un de l'autre, qui, par deux fils métalliques, envoient le courant tour à tour aux deux bobines électro-magnétiques qui influencent le style du chronographe. Arrivé dans ces bobines, le courant s'en échappe par d'autres fils qui se réunissent bientôt en un seul. Ce fil de retour unique va rejoindre le second pôle de la pile.

On voit, dans la figure 115, ces fils électriques au moment où ils sortent par trois bornes de la partie inférieure d'un disque situé à la base du chronographe et près de son support.

Ces fils désignés par la lettre *p* se rendent aux deux pôles de la petite pile. L'un s'y rend directement, c'est le fil qui porte le signe — (fil commun de retour des courants qui ont traversé l'une ou l'autre bobine). Les deux autres fils, qui portent le signe + et qui sont représentés tordus en une spirale commune, se rendent indirectement à la pile en traversant chacun : un des contacts de platine, le style du diapason, et le diapason lui-même, ainsi qu'il a été dit.

Les autres fils électriques et la grosse pile représentés dans la figure 10 sont destinés à d'autres usages dont nous allons parler.

Lorsqu'on veut se servir du chronographe, il faut, avec l'archet, mettre le diapason en vibration. Puis, au moyen d'une clef, on amène les contacts de platine à la rencontre du frotteur du diapason ; aussitôt le chronographe se met à vibrer.

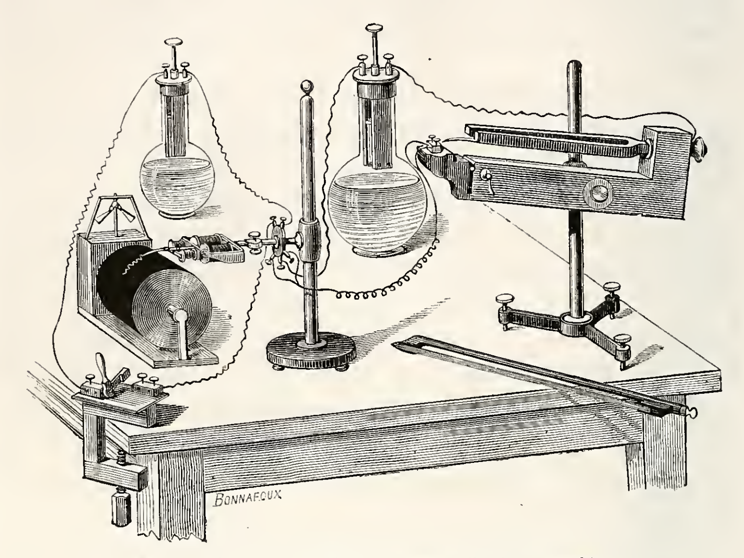


FIG. 116. — Disposition générale des appareils chronographiques.

Comme il y avait avantage à n'écrire les vibrations du chronographe qu'à un moment donné, j'ai recouru à deux autres bobines électro-magnétiques qui produisent à volonté un mouvement de latéralité destiné à amener le style du chronographe en contact avec le cylindre. Ces bobines, plus volumineuses que les autres, sont placées en arrière des petites, comme cela se voit dans les figures 115 et 116. Un fer doux F, attiré quand le courant passe, fait baisser le style du chronographe, qui écrit alors sur le cylindre ; quand, au contraire, par la rupture du courant, l'aimantation du fer doux cesse, un ressort antagoniste produit un mouvement inverse qui éloigne le style du cylindre, et le tracé est interrompu.

Ce chronographe, avons-nous dit, a besoin d'être réglé sur le nombre des vibrations du diapason, sans cela il serait entièrement rebelle à l'action des courants électriques. Dans la construction de l'instrument, ce réglage pourrait être fait

une fois pour toutes ; mais comme la moindre détérioration suffit pour l'altérer, il faut pouvoir le rétablir, ce que l'on fait au moyen de la vis de réglage qui change la longueur de la lame vibrante.

L'oreille suffit pour faire un réglage approximatif suffisant à mettre le style en vibration ; mais, si le réglage est imparfait, on constate l'existence de battements que l'on fait disparaître en tournant légèrement la vis, dans un sens ou dans l'autre, jusqu'à ce que l'égalité des vibrations soit parfaite.

IV. — Mesure de l'aspiration centrifuge pour différentes vitesses de rotation. — Applications à la mesure de la résistance de l'air.

En effectuant une série d'expériences, dans lesquelles on donne au mouvement rotatif des vitesses différentes, et dans lesquelles on recueille à la fois le *tracé des vitesses* et celui des *aspirations centrifuges*, on obtient tous les éléments nécessaires pour la construction d'une courbe qui exprime le rapport que nous cherchons.

Mais on a vu précédemment que, de l'aspiration centrifuge, on pouvait déduire la pression qui s'exerce sur les deux faces opposées d'un plan tournant, et qu'en multipliant la somme de ces deux pressions par la surface d'un disque, on aurait la valeur totale de la résistance que l'air opposerait au mouvement de ce disque. Il sera donc possible, avec le tracé de la vitesse et celui de l'aspiration centrifuge, d'établir la courbe des résistances de l'air pour une surface d'un mètre carré animée d'une série de vitesses différentes.

Parmi les tracés recueillis dans mes expériences, j'en ai pris un certain nombre qui correspondaient à une série de vitesses croissantes. Déterminant, pour chacun de ces tracés, la vitesse de rotation et la résistance de l'air, j'ai obtenu ainsi une série de points de la courbe des pressions rapportées aux vitesses. Voici le calcul fort simple qui permet de déterminer pour chaque tracé la vitesse et la résistance :

Reportons-nous à la figure 114 où l'on voit deux de ces tra-

Fig. 117. —Tableau 1.—Série de tracés indiquant l'aspiration centrifuge dans douze expériences faites avec des vitesses variant de 3 à 15 mètres par seconde. L'aspiration se mesure avec l'échelle (fig. 5), d'après l'écartement de la ligne pleine et de la ligne ponctuée qui correspond à zéro. La vitesse se déduit du nombre de millimètres occupés par 20 vibrations du chronographe.

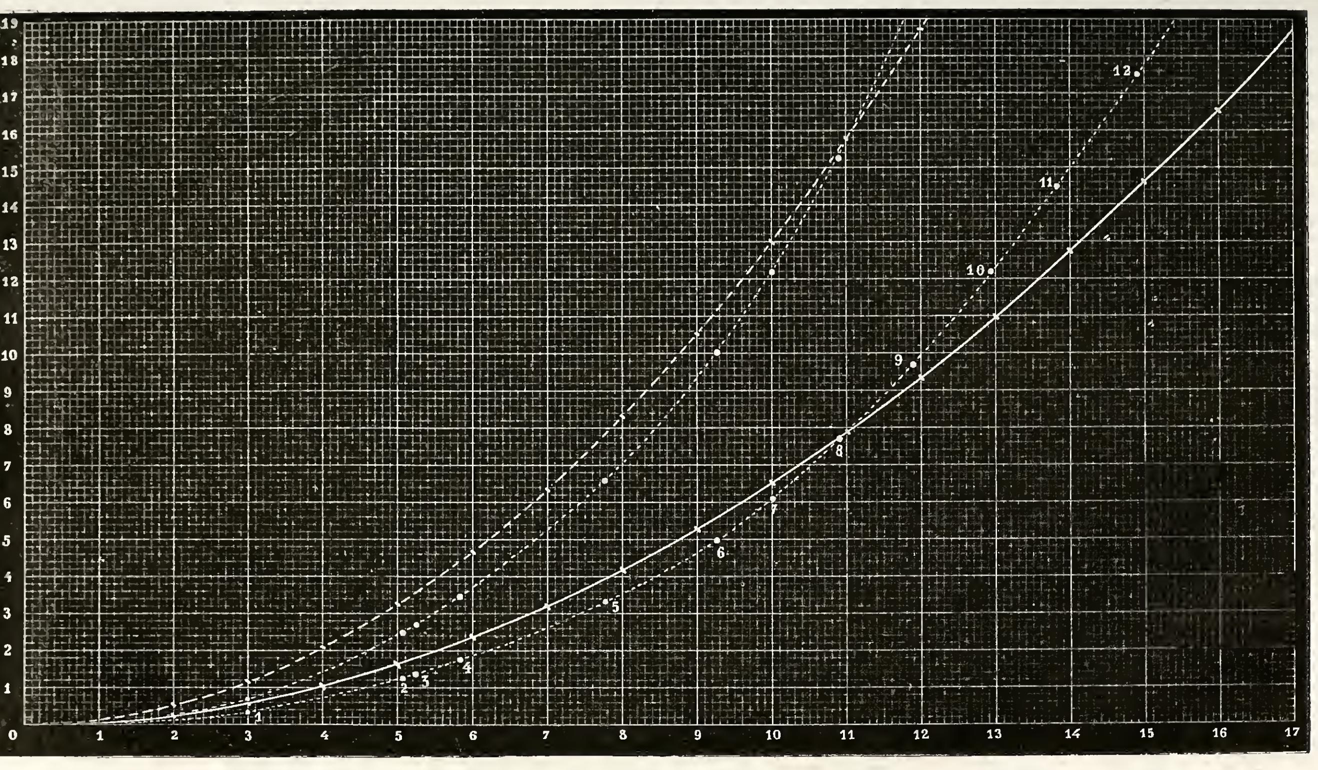


Fig. 118. — Tableau II. — La courbe construite par une série de points dont chacun porte un numéro d'ordre exprime l'accroissement de la pression au devant d'un plan d'un mètre de surface, pression calculée d'après l'aspiration centrifuge. — La courbe construite au-dessus de celle-ci par une série de points sans numéros d'ordre a des ordonnées doubles de la précédente; ce serait celle de la résistance de l'air d'après les expériences. — La courbe pleine exprime la pression de l'air au devant d'un plan, en admettant, pour un mètre carré de surface animé d'une vitesse d'un mètre, une pression de 65 grammes et en supposant que cette pression croisse comme le carré des vitesses. — Enfin, la courbe supérieure formée de traits serait, d'après la même hypothèse, celle de la résistance de l'air.

cés. Nous comptons sur chacun d'eux 20 vibrations du chronographe, et nous constatons que, sur le cylindre, ces vibrations occupent n centimètres. Si telle est la longueur du tracé pour 1/5e de seconde, il sera cinq fois plus long pour une seconde entière, soit $5 \times n$ centimètres. Or, comme la longueur du tracé est seulement 1/50 de l'espace parcouru par l'extrémité du tube, il faudra multiplier par 50 les $5 \times n$ centimètres parcourus sur le papier pour avoir l'espace réellement parcouru dans l'unité de temps, c'est-à-dire la vitesse.

Il s'agit ensuite de déterminer la résistance de l'air pour une surface d'un mètre carré, animée d'une vitesse de N mètres par seconde. C'est en la rapportant à l'unité de poids, le kilogramme, qu'on a l'habitude d'estimer cette résistance ; nous nous conformerons donc à cet usage.

Portons à côté du tracé de l'aspiration centrifuge l'échelle de graduation négative (fig. 100) qui a été construite pour le manomètre enregistreur, nous verrons que la pression négative est de x millimètres d'eau. Comme la résistance de l'air, pour chaque élément de surface, est formée de deux pressions, l'une positive, l'autre négative, qui agissent toutes deux contrairement au sens du mouvement et dont chacune est égale à l'aspiration centrifuge, nous aurons la valeur de la résistance de l'air, sur chaque élément de la surface du disque, en doublant celle de l'aspiration centrifuge, soit $2\,x$ millimètres d'eau.

Il faut multiplier cette pression ou résistance par la surface du plan. Or, un millimètre d'eau, répandu sur une surface d'un mètre carré, constitue un poids d'un kilogramme ; on aura donc, pour expression de la résistance de l'air en kilogrammes, le nombre de divisions de la graduation négative multiplié par 2.

Le tableau I représente une série de graphiques dont chacun porte l'indication de la vitesse et celle de résistance de l'air correspondante.

Afin de construire, d'après ce tableau, la courbe des pressions de l'air pour les différentes vitesses, convenons que les vitesses seront comptées sur l'axe des x, et les pressions sur l'axe des y ; que chaque mètre de vitesse correspondra

à un centimètre de longueur sur l'axe des abscisses, et chaque kilogramme de pression à 5 millimètres sur celui des ordonnées.

La courbe représentée tableau II est ainsi obtenue ; elle permet de voir que, pour les vitesses comprises entre 3 et 15 mètres, la pression de l'air ne croît pas tout à fait comme le carré des vitesses, ce qui était admis par la plupart des auteurs. La valeur de la résistance de l'air pour l'unité de surface, (un mètre carré) se transportant avec une série de vitesses différentes, s'obtient en doublant la valeur de la pression en avant du plan ; attendu qu'en arrière de celui-ci il existe une pression négative égale à la pression positive et agissant comme elle pour entraver le mouvement du disque. Cette courbe, construite par points, se trouve sur le tableau II au-dessus de la précédente.

Mon collègue M. Mascart, ainsi que M. Moutier, étaient arrivés à des résultats concordants, et évaluaient l'aspiration centrifuge à 65 grammes, pour une vitesse d'un mètre par seconde, d'après cette donnée expérimentale que je leur avais signalée : à savoir que l'aspiration centrifuge est égale à la pression positive au-devant d'un plan tournant. La courbe construite d'après cette valeur de 65 grammes pour la pression de l'air contre un plan d'un mètre de surface, animé d'une vitesse d'un mètre, en supposant que la pression croisse comme le carré des vitesses, est représentée sur le tableau par un trait plein. Pour obtenir la valeur théorique de la résistance de l'air, on a doublé ce coefficient ; car la résistance de l'air est produite, à la fois, par la pression positive qui s'exerce en avant d'un mobile et par la pression négative qui existe en arrière. Les valeurs calculées diffèrent sensiblement de la courbe expérimentale, surtout quand la vitesse de rotation du manége excède 10 mètres par seconde.

Le lecteur sera frappé sans doute d'une grave imperfection des appareils que j'ai employés dans les expériences précédentes : l'échelle des pressions indiquées par les manomètres inscripteurs est beaucoup trop petite, et, malgré sa netteté, rend les estimations difficiles et peu sûres. Il serait facile d'y remédier, si l'on employait la méthode graphique à des mesures de ce genre. Au lieu d'un tambour à membrane

élastique, on pourrait se servir d'un petit gazomètre qui plongerait ou émergerait de quantités aussi considérables qu'il serait nécessaire, et qui, de plus, aurait des déplacements proportionnels aux pressions.

V. — De la résistance de l'air sous l'aile de l'oiseau.

Si, maintenant, on prend ces valeurs de la résistance de l'air et si on les applique au cas du vol des oiseaux, on les trouve absolument insuffisantes pour remplir les conditions nécessaires; c'est-à-dire qu'une surface semblable à celle d'une aile d'oiseau, s'abaissant avec la vitesse qu'indique la courbe d'abaissement de l'aile, éprouverait une résistance de beaucoup inférieure à la moitié du poids de l'oiseau.

D'autre part, en répétant les expériences schématiques décrites dans le deuxième mémoire (1), expériences dans lesquelles un oiseau factice se soulevait en donnant un coup d'aile, je constatais que ce coup d'aile est toujours beaucoup plus rapide que celui que donne l'oiseau véritable. Il semblait donc que l'air résistât moins pour mes appareils que pour l'aile d'un oiseau qui vole.

Je reculai d'abord devant l'absurdité apparente de cette conclusion, et pourtant, plus je mesurais la vitesse de l'aile des oiseaux, plus j'arrivais à me convaincre que cette vitesse ne pourrait les soutenir sur l'air, si quelque condition qui manque dans mes appareils schématiques ne vient pas augmenter la résistance de l'air sous l'aile de l'oiseau.

Cette condition qui accroît la résistance de l'air sous l'aile, c'est la *translation de l'oiseau*. Voici comment je me suis représenté d'abord l'influence de cette translation :

L'air, comme tous les corps pondérables, présente les effets de l'*inertie*, c'est-à-dire que, soumis à une force impulsive prolongée, il résiste fortement pendant les premiers instants, puis acquiert une vitesse, et enfin tend à garder cette vitesse quand la force impulsive vient à cesser.

Si l'on prend un disque léger auquel on imprime une translation uniforme, suivant une direction perpendiculaire à son

(1) *Bibliothèque des hautes études*, t. V, p. 18.

plan, on peut, au moyen d'un dynamomètre inscripteur placé en arrière du disque, constater la résistance de l'air aux différents instants du mouvement. On voit alors : 1° une résistance considérable au début du mouvement, c'est l'effet de l'inertie de la colonnne d'air que le disque tend à déplacer ; 2° une pression plus faible qui se maintient pendant toute la durée du mouvement ; 3° une tendance à l'entraînement du disque lorsque celui-ci s'arrête : cet entraînement est dû à la vitesse acquise de la colonne d'air mise en mouvement.

Ainsi, la résistance que l'air présente au mouvement d'un corps se compose d'un *régime régulier* précédé et suivi de deux *états variables*. Le régime régulier est ce que les différents expérimentateurs ont cherché à mesurer ; c'est lui que j'ai tenté d'estimer dans les expériences précédentes ; c'est à lui seul que s'appliquent toutes les estimations données de la résistance de l'air à un mobile animé de différentes vitesses.

S'il est démontré que, pendant l'état variable initial, la résistance de l'air atteint son maximum, il est clair que l'aile d'un oiseau devra trouver sur l'air un point d'appui plus solide si, pendant toute la durée de son abaissement, elle peut se placer dans les conditions initiales. Or, par suite de la translation de l'oiseau, l'aile, à chaque instant de sa descente, vient agir sur une nouvelle colonne d'air qu'elle tend à abaisser ; mais, par suite de la faible durée de la pression qu'elle reçoit, chacune de ces colonnes d'air n'a pas le temps d'acquérir la vitesse de l'aile ; elle se comprime donc, et présente la résistance maximum de l'état variable initial.

Il fallait vérifier cette théorie par des expériences ; je les ai variées de différentes manières, et j'ai toujours constaté cet accroissement de la résistance de l'air se traduisant par un ralentissement des mouvements de l'aile (1).

Première série d'expériences. — J'ai construit un oiseau artificiel dont les ailes étaient actionnées par une pompe à air analogue à celle qui a servi pour le schéma de l'insecte,

(1) Lorsque je présentai le résultat de ces expériences à l'Académie des sciences, MM. Planavergne adressèrent une réclamation, et prouvèrent, en effet, qu'ils avaient indiqué cet accroissement de la résistance de l'air sous l'influence de la translation de l'oiseau. Il ne m'en a pas moins semblé indispensable de vérifier cette théorie par des expériences, et surtout de donner des mesures de cet accroissement de la résistance de l'air par la translation.

mais de plus grandes dimensions. Cet oiseau était placé à l'extrémité du bras d'un manége ; une petite machine à vapeur imprimait à la pompe, et aux ailes par conséquent, un mouvement égal et régulier. On commençait à faire battre les ailes, l'oiseau restant en place, et l'on notait l'amplitude des oscillations des ailes ; celles-ci formaient, entre leurs positions extrêmes, un angle de 60 degrés environ.

On faisait alors tourner le manége, avec une rapidité croissant jusqu'à 10 mètres par seconde ; on voyait alors l'amplitude des battements se réduire à 30 et meme à 20 degrés. Or, rien n'était changé dans la fréquence des coups d'ailes, ni dans le travail moteur dépensé par la machine ; il fallait donc admettre un accroissement de la résistance de l'air pour expliquer cette diminution dans l'amplitude des battements des ailes, autrement dit, cette diminution dans la vitesse de leurs mouvements, puisque la fréquence restait la même.

Du reste, j'ai donné une expression graphique à cette expérience, en écrivant sur un cylindre immobile placé sur l'axe du manége : d'une part les vibrations d'un diapason chronographe, d'autre part les amplitudes des coups d'ailes.

La figure 119 est une réduction photographique du tracé obtenu. On y voit que, pendant que la vitesse de translation est faible, c'est-à-dire tant que les tracés du diapason chronographe sont très-serrés, l'amplitude des coups d'aile, représentée par la courbe supérieure, est très-considérable, et qu'à mesure que la vitesse s'accroît, ce qui se mesure à l'étendue de chaque vibration du chronographe, la hauteur de la courbe de l'aile va en diminuant.

Deuxième série d'expériences. — Craignant que, dans le mouvement rotatif du manége, il ne se produisît quelque perturbation des mouvements, je fis une autre série d'expériences sur des appareils animés d'un mouvement de translation rectiligne.

Pour obtenir cette détermination, j'ai grossièrement imité la disposition de l'oiseau, en réduisant chacune des ailes à un plan mince et rigide ayant $0^m,50$ de long sur $0^m,10$ de large. Ces deux ailes, solidaires l'une de l'autre, s'abaissent à un moment donné, sous l'influence de la détente d'un ressort. Un travail constant est ainsi dépensé pour chaque coup d'aile.

La translation de la machine se fait par glissement sur un fil de fer horizontalement tendu.

Deux grandes poulies placées aux deux extrémités de la salle, dont l'une est mise en mouvement à l'aide d'une manivelle, entraînent une corde sans fin, dont l'un des brins est parallèle au fil de fer sur lequel glisse l'oiseau. C'est ce brin de la corde qui imprime à l'appareil une vitesse horizontale plus ou moins grande. Il s'agit de mesurer avec précision cette vitesse de translation et la durée de l'abaissement des ailes. La méthode graphique donne ces mesures au moyen de la disposition suivante :

a) *Mesure des vitesses de translation de la machine.* — Cette vitesse n'est autre que celle de la corde sans fin qui produit l'entraînement. Or, cette corde s'enroule sur une petite poulie dont les tours sont comptés et inscrits sur un cylindre tournant, au moyen d'un style qui fonctionne à peu près comme le télégraphe Morse. La poulie qui sert au comptage des vitesses a exactement 0m,40 de circonférence ; elle porte, sur la moitié de son périmètre, une armure métalli-

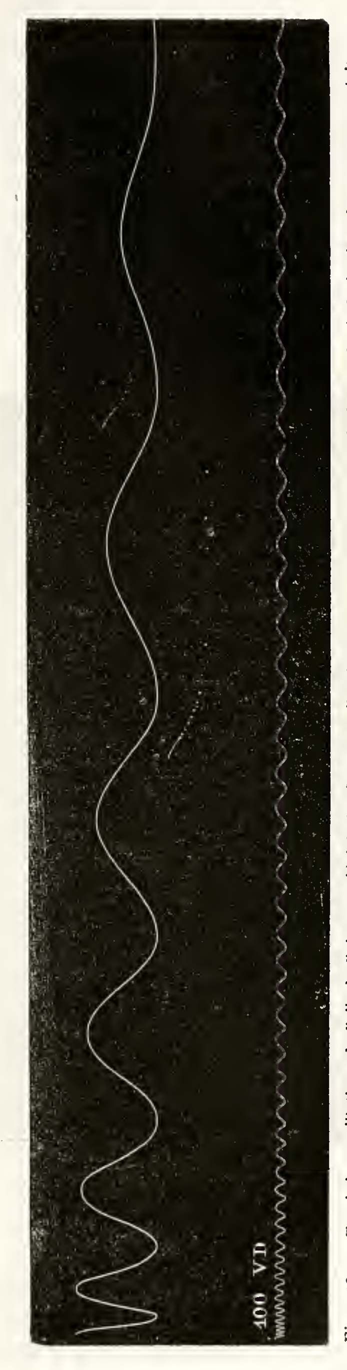


Fig. 119. — Tracé des oscillations de l'aile de l'oiseau artificiel. Au dessous, vibrations du chronographe. On voit de gauche à droite les changements produits par l'accroissement de la vitesse de translation de l'oiseau. (Réduction photographique.)

que qui ferme un courant de pile lorsque deux frotteurs viennent la rencontrer, ce qui arrive pendant la moitié de chacun des tours de poulie. Le style inscripteur, mis en mouvement par un électro-aimant, trace une ligne crénelée qui, à chacun de ses changements de direction, indique que $0^m,20$ de corde ont défilé, c'est-à-dire que l'oiseau artificiel a parcouru cet espace. Ainsi, plus la translation imprimée à l'oiseau est rapide, plus grand est le nombre de sinuosités inscrites pendant une seconde sur le cylindre dont la rotation est uniforme.

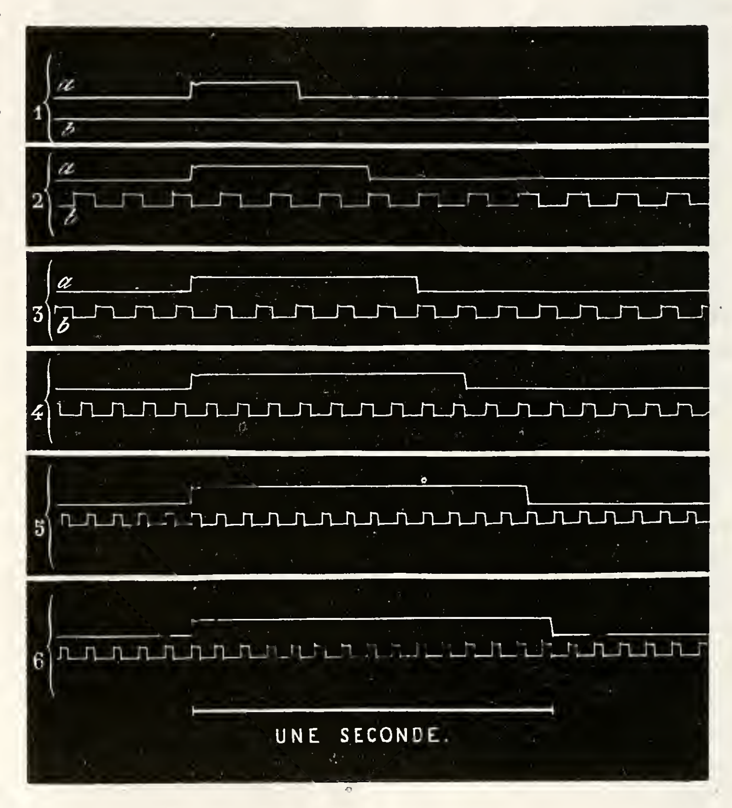


Fig. 120. — Six expériences pour mesurer la durée d'abaissement de l'aile d'un oiseau factice animé de translations plus ou moins rapides.

b) *Mesure de la durée d'abaissement des ailes.* — Un second inscripteur électrique, semblable à celui qui compte les tours de poulie, sert à déterminer la durée de l'abaissement des

ailes. Il faut, qu'au début de cet abaissement, un courant de pile soit rompu, ce qui est signalé par un changement dans la ligne tracée sur le cylindre, et qu'à la fin de l'abaissement des ailes, le courant soit fermé de nouveau, ce que l'inscripteur signale encore.

On recueille simultanément le tracé des vitesses de translation et celui des durées d'abaissement des ailes, et l'on obtient une série de déterminations dont la figure 120 fournit quelques exemples.

Expérience I. — La ligne supérieure *a* indique la durée de l'abaissement des ailes; en prenant cette longueur sur l'échelle du temps, on voit que l'abaissement de l'aile durait moins de 1/3 de seconde. Dans cette expérience, il n'y pas eu de translation de l'oiseau : la ligne *b* ne présente aucune inflexion.

Expérience II. — La durée de l'abaissement des ailes (ligne *a*) est déjà plus grande; elle excède une demi-seconde. La translation était alors de 3 mètres par seconde. On s'en assure en prenant au compas sur la ligne *b* la longueur qui correspond à cinq changements de direction de la courbe, ce qui indique que cinq fois $0^{m},20$, c'est-à-dire un mètre, ont été parcourus. On porte cette longueur sur l'échelle des temps, et l'on constate que, dans une seconde, elle est contenue environ trois fois : on voit donc déjà que la durée d'abaissement de l'aile croît avec la vitesse.

Expériences III, IV, V, VI. — Dans ces autres expériences, en procédant de la même manière, on trouve que la durée de l'abaissement de l'aile s'accroît toujours quand la vitesse de translation augmente, et qu'avec une vitesse de $5^{m},50$, l'abaissement de l'aile dure environ une seconde.

Il ne m'a pas été possible de trouver un rapport parfaitement précis entre la vitesse de translation et la durée de l'abaissement de l'aile. Des expériences faites dans des conditions identiques présentent parfois de légers écarts qui tiennent à ce que la moindre oscillation du fil de fer qui sert de rail change légèrement la durée du phénomène. D'après ces premiers essais, il semble toutefois que la durée de l'abaissement de l'aile croisse proportionnellement à la vitesse de translation, dans les limites de vitesse sur lesquelles j'ai

pu opérer. Cette influence de la translation de l'oiseau éclaire un des points les plus obscurs de la théorie du vol. Elle explique comment, avec une vitesse d'abaissement très-faible, l'aile trouve cependant sur l'air un point d'appui suffisant pour soutenir l'oiseau; enfin elle rend compte de certains faits que l'observation ou l'expérience avaient démontrés et dont voici quelques exemples :

Quand un oiseau s'envole, les mouvements de ses ailes sont très-étendus; ils le sont moins quand l'oiseau a pris sa vitesse (1).

Quand un oiseau vole attaché à un fil, il tombe, malgré ses coups d'ailes, aussitôt que la tension du fil vient arrêter sa vitesse horizontale.

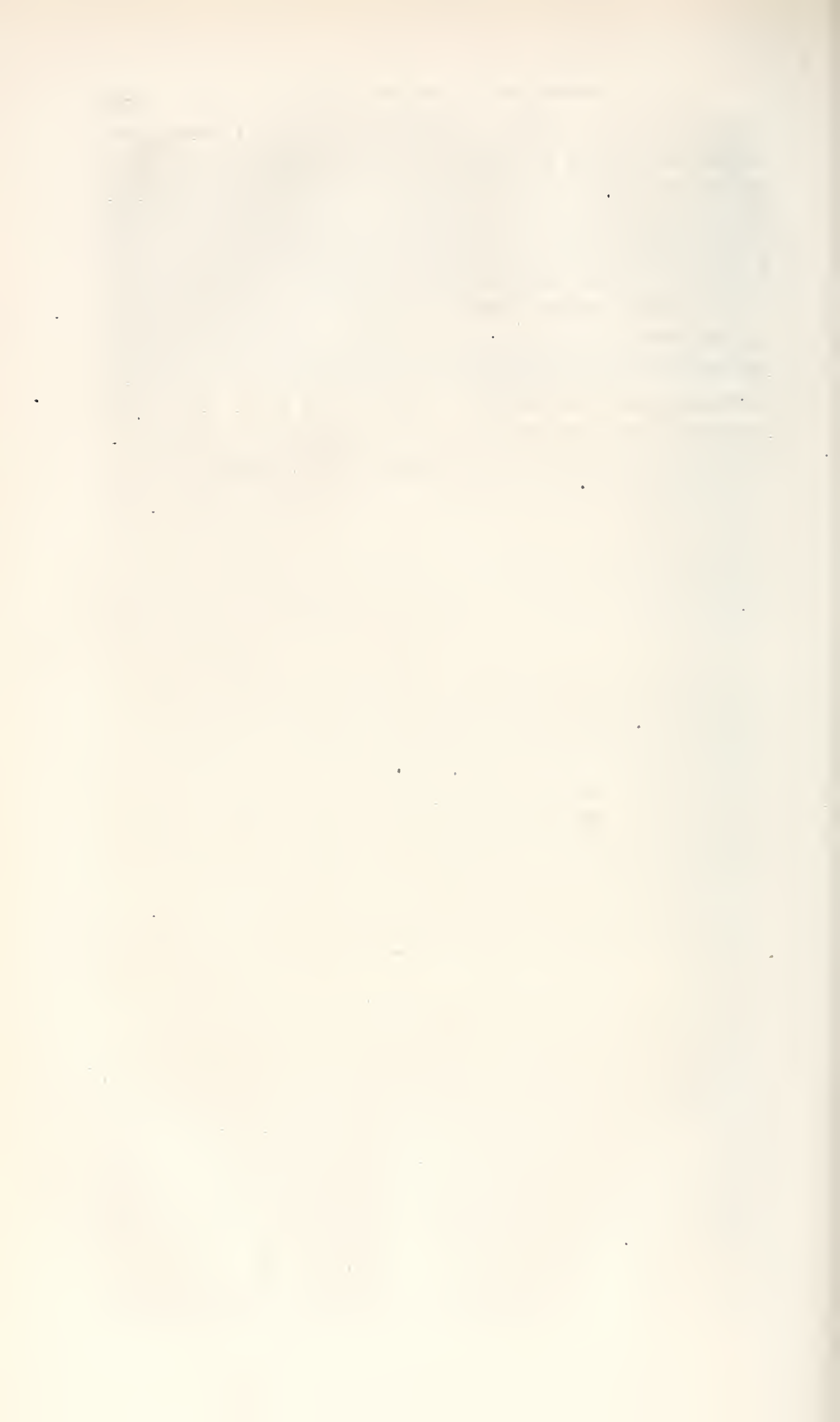
Un oiseau qui s'envole s'oriente autant que possible le bec au vent (d'Esterno); c'est parce qu'alors le vent, apportant sans cesse de nouvelles couches d'air sous ses ailes, place l'oiseau dans les mêmes conditions que s'il avait une translation horizontale.

Quand on attelle un oiseau à un manége (2), on voit que si l'on imprime à la machine un rapide mouvement de rotation, les battements des ailes prennent une lenteur extrême. La révolution de l'aile d'un pigeon peut alors durer plus d'une seconde, au lieu d'un cinquième de seconde, qui est sa durée moyenne. Comme tout mouvement musculaire se ralentit en raison des résistances qu'il éprouve, cette expérience est une des meilleures qu'on puisse donner pour prouver l'accroissement de la résistance de l'air par la vitesse de translation de l'oiseau.

Si l'on considère la trajectoire de l'aile dont l'abaissement se combine avec la translation de l'oiseau, on voit que cette ligne est oblique et qu'elle se rapproche de plus en plus de l'horizontalité à mesure que la translation de l'oiseau est plus rapide. Or, l'aile, en s'abaissant, reste horizontale dans l'appareil ci-dessus ; il s'ensuit que le plan de cette aile fait un angle avec la direction de son mouvement, et que cet angle est d'autant plus petit que la translation est plus rapide. A ce

(1) *Voyez* deuxième mémoire, t. V, p. 36, fig. 14.
(2) *Voyez* premier mémoire, t. I, p. 221, fig. 30.

point de vue, les effets de la translation de l'oiseau pour augmenter le point d'appui sur l'air se rattachent au cas plus général des plans inclinés qui se déplacent en faisant un angle plus ou mois aigu avec la direction de leur mouvement. Les auteurs qui se sont occupés de ce genre d'études, MM. Wenham, de l'Ouvrié, Pénaud, etc., s'accordent à admettre que les plus petits angles formés par le plan avec la direction de son mouvement donnent les conditions les plus favorables. On est donc en droit de supposer que des vitesses de translation beaucoup plus grandes que celles que j'ai pu employer auraient encore augmenté considérablement la durée de l'abaissement de l'aile, en augmentant la résistance de l'air.



VII.

LA MÉTHODE GRAPHIQUE DANS LES SCIENCES EXPÉRIMENTALES (SUITE) [1].

IV. — **Rapports de l'espace au temps.**

Espaces parcourus. — Vitesses. — Expression graphique des changements d'espace. — Courbe des vitesses. — Appareils inscripteurs d'un mouvement simple. — Modifications que doivent recevoir ces appareils suivant la vitesse ou l'étendue du mouvement.

A) *Rapports de l'espace au temps.* — Nous avons considéré isolément les notions d'espace et de temps ; nous avons vu combien la méthode graphique introduit de précision dans la mesure et dans l'expression de ces deux éléments de tout phénomène, et avec quelle clarté elle les exprime. Passant à une notion plus complexe, nous allons étudier les applications de la méthode graphique à la mesure et à l'expression des rapports de l'espace au temps.

Tout problème mécanique offre à considérer le déplacement de certains corps, l'espace qu'ils ont parcouru à certain instant ou la vitesse avec laquelle ils se meuvent. La géométrie analytique possède depuis Descartes l'expression parfaite de ces rapports.

Les courbes construites dans le système des *coordonnées orthogonales* permettent d'exprimer les positions que le corps a occupées successivement dans une série d'instants ; elles

(1) *Voir* p. 122.

donnent en outre, au moyen d'une construction fort simple, la vitesse du mouvement à un instant quelconque.

Dans la construction d'une courbe de mouvement, le système le plus simple, le plus clairement intelligible, est celui dans lequel la position d'un corps qui se meut dans un plan est déterminée par rapport à deux axes ou coordonnées perpendiculaires l'un à l'autre ; d'où le nom d'orthogonal appliqué à ce système.

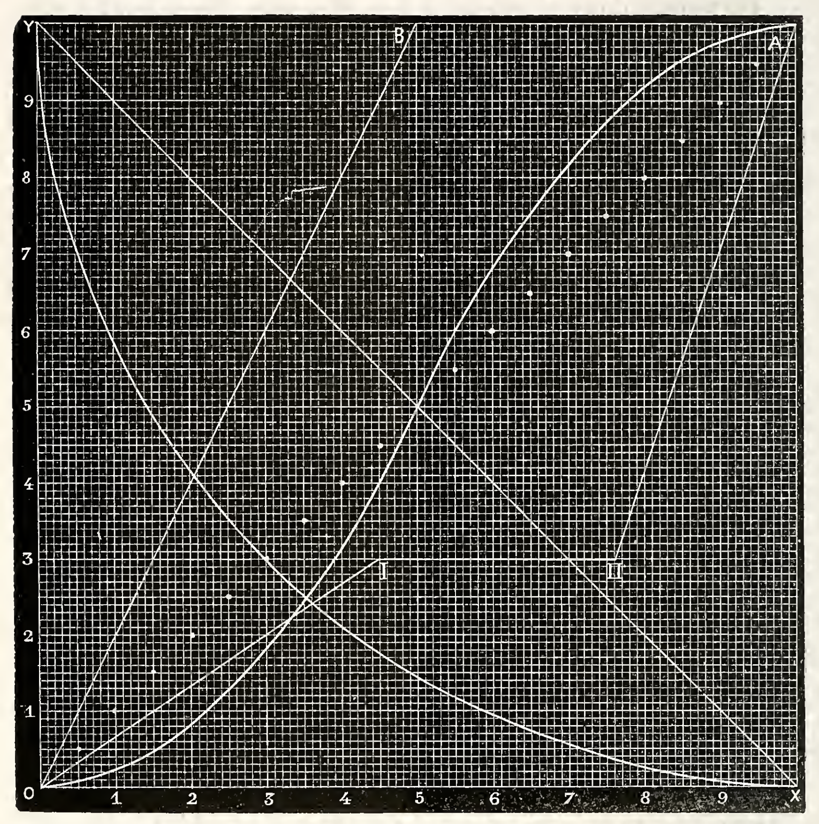


Fig. 121. — Expressions graphiques de mouvements de différentes natures. — OX, axe des X ou des abscisses ; 1, 2, 3, 4, etc., divisions du temps en secondes.—OY, axe des Y ou ordonnées; 1, 2, 3, 4, etc., divisions de l'espace en mètres. — Ligne ponctuée AO, mouvement uniforme lent ascendant. — OB, mouvement uniforme ascendant plus rapide. — OIIIA, combinaison de mouvements ascendants et d'arrêt : OI, mouvement uniforme lent ; III, arrêt ; IIA, mouvement uniforme rapide. — OA, ligne courbe : mouvement ascendant accéléré puis diminué. — YX (ligne droite), mouvement uniforme descendant. — YX (ligne courbe), mouvement descendant diminué.

De ces axes, l'un horizontal (axe des abscisses) sert à

mesurer les temps ; l'autre vertical (axe des ordonnées), sert à mesurer les espaces parcourus.

Pour prendre un exemple simple (fig. 121), comptons les temps en secondes sur l'axe horizontal OX et les espaces en mètres sur l'axe vertical OY. Si nous voulons exprimer que le corps en mouvement parcourt un mètre par seconde, nous indiquerons la position de ce corps à la fin de la 1re seconde par un point qui sera situé à l'entre-croisement de deux lignes, perpendiculaires chacune à l'un des axes coordonnés et passant, l'une par la 1re division du temps, l'autre par la 1re division de l'espace. Au bout de la 2e seconde, la position du corps serait définie par un 2e point placé à l'intersection de deux lignes parallèles aux précédentes et menées, l'une par la 2e division du temps, l'autre par la 2e division de l'espace. Une série de points de ce genre définira la trajectoire parcourue par le mobile. Cette série de points OA, tendra à se transformer en une ligne continue quand les déterminations des positions successives du corps seront faites à des intervalles de temps de plus en plus courts, par exemple, à toutes les demi-secondes ou à tous les 1/10 de seconde.

Si les rapports de l'espace au temps sont différents ; si, par exemple, le corps parcourt 2 mètres par seconde, sa trajectoire sera exprimée par la ligne OB passant par l'intersection des perpendiculaires 1, 2, 3, etc., élevées à chacune des divisions du temps avec les lignes 2, 4, 6, etc., perpendiculaires à l'axe des ordonnées.

Plus la vitesse du mouvement sera grande, plus la trajectoire se rapprochera de l'axe des Y (ordonnées) ; plus la vitesse sera faible, plus la trajectoire se rapprochera de l'axe des X (abscisses). Ainsi, quand le mouvement du corps qu'on étudie est uniforme, sa trajectoire se traduit par une ligne droite, plus ou moins oblique suivant la vitesse, et s'approchant d'autant plus de la verticalité que la vitesse est plus grande.

Mais si le mouvement est varié, la trajectoire change à chaque instant d'inclinaison et mérite réellement le nom de *courbe* qu'on donne, d'une manière générale, à tous ces tracés du mouvement.

Un mouvement accéléré ascendant se traduit par une courbe à concavité supérieure ; un mouvement diminué par une courbe

à convexité supérieure. Ainsi, dans la figure 121, la courbe OA représente un mouvement d'abord accéléré, puis diminué.

Ces courbes expriment, avons-nous dit, les positions successives du corps en mouvement ; elles fournissent directement la mesure de l'*espace parcouru*, mais pour en déduire la *vitesse* de translation, exprimée en courbe, il faudrait faire une construction particulière, dont nous aurons rarement besoin (1).

Si l'on convient que l'ascension de la ligne indique un déplacement dans un sens, la descente exprimera un déplacement en sens inverse. Ainsi la courbe $y\ x$ exprime un mouvement diminué et descendant, la droite $y\ x$ un mouvement uniforme descendant.

Ce mode d'expression des mouvements et du sens dans lequel ils se produisent a reçu d'utiles applications ; aucune, toutefois, ne me paraît plus saisissante ni plus utile, que celle qui a pour objet d'indiquer la marche des trains sur une ligne de chemins de fer, figure 122.

(1) La vitesse est le rapport de l'espace parcouru au temps employé à le parcourir ; elle a pour formule $\frac{e}{t}$, tandis que l'espace parcouru aurait pour formule $e\ t$. Ainsi, l'espace parcouru est un produit, la vitesse un quotient. Dans le cas de mouvement uniforme, l'*espace parcouru* s'exprime par une ligne qui s'élève sans cesse d'une quantité égale pendant des temps égaux, tandis que la *vitesse*, étant constante, doit se traduire par une ligne qui exprime cette constance en gardant les mêmes rapports avec l'axe des ordonnées ; ce sera donc une ligne horizontale. Plus la vitesse sera grande, plus le niveau de cette ligne sera élevé. Enfin, si la vitesse varie, l'élévation de la ligne variera et l'on aura une courbe qui exprimera, par ses élévations, que la vitesse augmente, et par ses abaissements qu'elle diminue.

Pour construire cette courbe, on se sert de celle des espaces parcourus, en procédant de la manière suivante : à chaque point de la courbe des espaces où l'on veut estimer la vitesse du mouvement, on mène la tangente à cette courbe et on la prolonge jusqu'à la rencontre de l'axe des X. De ce point de rencontre comme centre, avec une longueur quelconque comme rayon, on trace l'arc de l'angle formé par la tangente et l'axe des X ; la tangente trigonométrique de cet angle donnera la valeur de la vitesse. Dans une série de déterminations successives, il faut, pour tracer la série des angles obtenus, se servir de la même ouverture de compas. La série des tangentes de ces angles fournira les rapports des différentes vitesses, et permettra de construire la courbe des vitesses.

Dans cette courbe nouvelle, à chaque division du temps, on élève une ordonnée égale à la tangente trigonométrique de l'angle que fait avec l'horizontale la tangente à la courbe des espaces, prise à la même division du temps.

A la seule inspection du graphique, le lecteur aperçoit le mouvement complet qui se fait sur la ligne : le nombre des trains, la situation de chacun d'eux à un moment donné ; leur vitesse relative, les points où ils se croisent, les arrêts plus ou moins longs, etc. ; on ne saurait trop admirer la simplicité que la forme graphique a introduite dans une chose aussi compliquée.

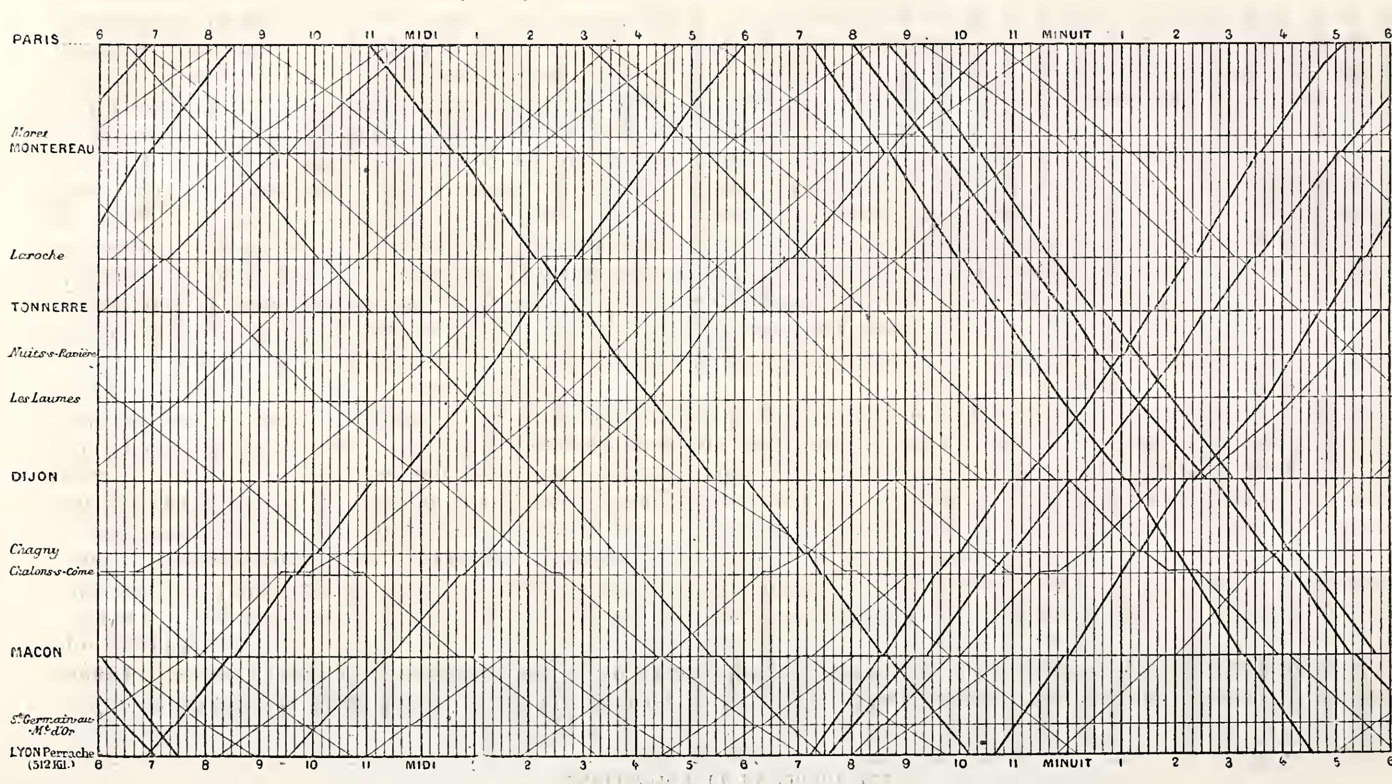
Tout le mouvement des trains de voyageurs de la grande ligne entre Paris et Lyon est compris dans ce tableau, qui correspond à plusieurs pages de l'*Indicateur* ordinaire. A l'usage des employés de la ligne, ces tableaux comprennent aussi les trains de marchandises sous forme de lignes ponctuées. Chaque train porte un numéro d'ordre. Ces tableaux sont si précieux, qu'on ne saurait, sans leur secours, se reconnaître au milieu du mouvement, aujourd'hui si compliqué, des grandes lignes ferrées.

B) *Appareils inscripteurs du mouvement.* — Les courbes dont on vient de voir quelques exemples sont construites géométriquement d'après les document fournis par des observations successives. C'est parfois un travail considérable que de tracer des courbes de ce genre. Aussi, doit-on considérer comme un progrès considérable l'invention d'instruments qui tracent d'eux-mêmes la courbe des espaces parcourus.

C'est à Poncelet et au général Morin qu'on doit le premier appareil de ce genre, figure 123 ; il était destiné à inscrire le mouvement des corps qui tombent sous l'action de la pesanteur. Le corps qui tombe porte un style qui trace sur un cylindre tournant uniformément autour d'un axe vertical ; la combinaison de ces deux mouvements perpendiculaires l'un à l'autre, dont l'un est uniforme et l'autre uniformément accéléré, donne naissance à une courbe parabolique, d'où l'on tire aisément toutes les lois de la chute des corps si laborieusement dégagées des expériences de Galilée, d'Atwood et de tous les physiciens. Nous parlerons plus loin des courbes obtenues dans ces expériences.

Désirant appliquer à un grand nombre de cas la méthode d'inscription directe du mouvement, j'ai adopté quelques dispositions particulières qui vont être décrites.

Fig. 122. — Graphique de la marche des trains sur un chemin de fer.



EXPLICATION DE LA FIGURE 122.

Lorsqu'on place la figure devant soi, on lit à gauche, sur l'axe des ordonnées, la série des stations, c'est-à-dire les divisions de l'espace à parcourir ; l'écartement des stations entre elles est, sur le papier, proportionnel aux distances kilométriques qui les séparent.

Dans le sens horizontal, c'est-à-dire sur l'axe des abscisses, sont comptées les divisions du temps en heures, partagées elles-mêmes en subdivisions de 10 minutes chacune. La largeur du tableau est telle, que les 24 heures du jour y sont représentées, commençant à 6 heures du matin et finissant le lendemain à la même heure.

Si l'on voulait exprimer qu'un train est sur un certain point de la ligne à une certaine heure, on pointerait sa position sur le tableau, en face de la station ou du point quelconque de la ligne qu'il occupe, et sur la division du temps convenablement choisie. Un seul point du tableau satisfait à ces conditions. A des instants successifs, le train occupera des points toujours différents du tableau ; la série de ces points donnera naissance à une ligne qui sera descendante et oblique de gauche à droite pour les trains venant de Paris, tandis qu'elle sera ascendante et oblique dans le même sens pour les trains montant sur Paris.

La ligne qui correspond à chacun des trains exprime : les heures de départ et d'arrivée, les vitesses relatives et absolues des trains, l'instant des passages à chacune des stations, et la durée des arrêts.

En effet, si nous considérons un train en particulier, nous voyons que de la station de Paris, un train part à 11 heures du matin ; si nous suivons ce train dans sa marche descendante, nous constatons qu'il subit 7 arrêts (pendant lesquels il ne se déplace plus suivant l'espace, mais seulement suivant le temps. Ces arrêts se traduisent par la direction horizontale de la ligne en face de la station où ils se produisent ; la longueur de cette ligne horizontale mesure la durée de l'arrêt. La ligne du train, suivie jusqu'à la fin, montre que l'arrivée se fait à 10 heures 10 minutes après midi ; or si l'on compte les parcours sur l'axe des ordonnées, on voit que 512 kilomètres ont été parcourus en 11 heures 10 minutes, arrêts compris, ce qui fait une vitesse moyenne d'environ 46 kilomètres à l'heure.

On voit de même que le train partant de Lyon à 6 heures 55 du matin arrive à Paris à 6 heures du soir. Cette ligne croise celle que nous venons de décrire entre les stations de *Tonnerre* et de *Laroche ;* en ce point a lieu le croisement de l'express qui monte avec celui qui descend. Les vitesses relatives de tous les trains sont faciles à saisir du premier coup d'œil, d'après l'inclinaison des lignes qui représente la marche de chacun. Plus cette marche est rapide, plus la ligne qui l'exprime s'approche de la verticalité. De plus, on a représenté par des traits plus forts les trains à marche rapide.

Le cylindre couvert de papier enfumé, déjà employé pour la chronographie, sert aussi à inscrire ces courbes; il suffit de disposer un style de façon que le mouvement qu'on veut inscrire entraîne la pointe écrivante, dans un sens ou dans l'autre, perpendiculairement au sens de la rotation du cylindre. De la combinaison rectangulaire du déplacement du style avec celui du papier, naissent des courbes variées qui expriment toutes les phases du mouvement enregistré.

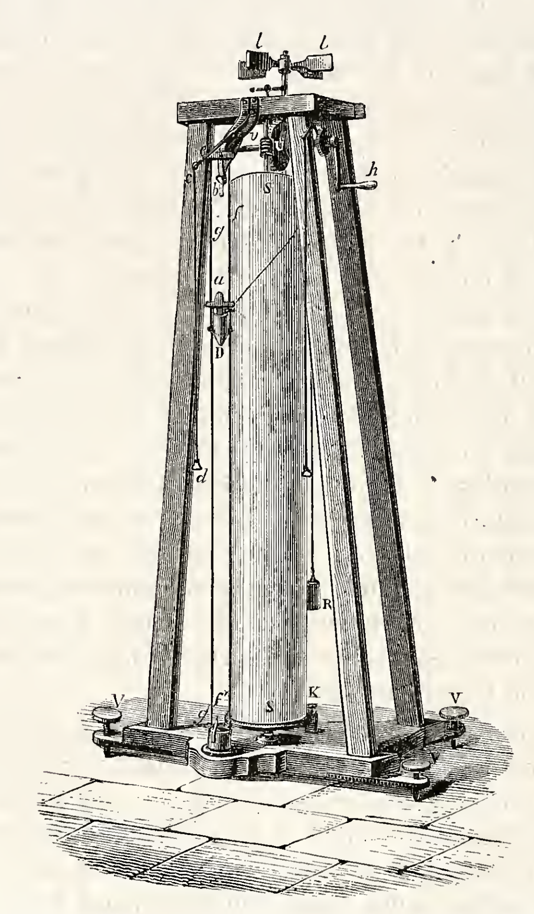


Fig. 123. — Machine de Poncelet et Morin pour inscrire le mouvement d'un corps qui tombe

J'ai dit toute l'importance qu'il faut attacher à la simplification des appareils; mais, tout en cherchant à en réduire le nombre, on ne peut, sans leur faire subir certaines modifica-

tions, les employer à l'inscription de tous les mouvements. La vitesse du cylindre et l'amplitude des déplacements du style doivent être susceptibles de varier suivant les circonstances.

Imaginons un mouvement très-lent qui mette une heure, par exemple, à faire parcourir au style la longueur du cylindre, et susposons que celui-ci fasse un tour à la minute Pendant le déplacement complet du style, le cylindre fera soixante tours et au lieu d'une courbe unique, portera soixante lignes, si peu inclinées qu'elles sembleront être parallèles à l'axe des abscisses. Pour obtenir une courbe unique qui permette de juger le mieux possible la nature du mouvement qu'on étudie, il faut égaler autant que possible la vitesse du papier à celle du style. L'emploi d'un cylindre faisant un tour à l'heure serait la meilleure disposition à prendre dans le cas ci-dessus. Réciproquement, quand il s'agit d'inscrire un mouvement très-rapide, on devra donner au cylindre une grande vitesse : un ou plusieurs tours à la seconde.

Quant au mouvement à étudier, son étendue plus ou moins grande impose également certaines modifications des appareils. — Il est bien entendu que nous n'avons en vue, pour le moment, que l'étude des mouvements simples, c'est-à-dire s'exécutant en ligne droite, dans un seul sens ou dans deux sens différents. — Pour être inscrits directement et avec leur étendue naturelle, il faut que ces mouvements n'excèdent pas la longueur du cylindre, ce qui n'arrive que dans un petit nombre de cas. Le plus souvent, pour ramener le mouvement à une étendue convenable, il faudra le réduire ou l'amplifier.

Voici la disposition qui m'a paru répondre à toutes les nécessités de l'expérimentation.

Mouvement du cylindre. — Au lieu de relier le cylindre à un mouvement d'horlogerie capable, tout au plus, de lui imprimer trois ou quatre vitesses différentes, je munis l'axe du cylindre d'une poulie dont la gorge reçoit une corde sans fin. Suivant la nature du mouvement qu'on veut étudier, on adapte la corde motrice à des rouages plus ou moins rapides, depuis l'horloge qui donne un tour en une journée, jusqu'au moteur rapide qu'une manivelle commande et qui peut exécuter un grand nombre de tours en une seconde. Quand on se sert de moteurs à marche uniforme, on peut régler la vitesse en va-

riant le diamètre des poulies (1). Dans tous les cas, la précision n'est parfaite qu'autant qu'on inscrit les temps sur le cylindre lui-même, soit avec le chronographe qui donne le centième de seconde, soit par une horloge qui pointe les secondes, les minutes ou les heures.

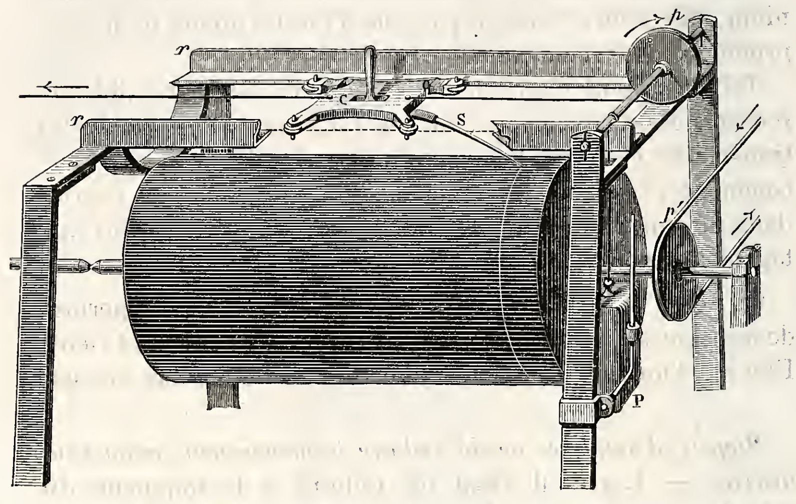


Fig. 124. — Appareil pour inscrire un mouvement rectiligne quelconque.

Mouvements du style. — Ces mouvements sont rectilignes; le style, en les exécutant, doit rester à une distance constante du cylindre. Ce double effet s'obtient en guidant le style au moyen d'un chariot *c* qui court sur deux rails parallèles. La figure 124 montre la disposition que j'adopte (2). Le chariot *c* porte en dessous une pointe flexible *s* qui, sous l'action d'un excentrique, s'abaisse plus ou moins à volonté, de manière

(1) Une disposition qui permet de régler, par tâtonnement, la vitesse du cylindre quand elle est approchée du degré convenable, consiste à employer comme moteur l'axe d'un galet qui roule par sa tranche sur un disque tournant. Suivant que le galet repose sur le disque moteur en un point plus ou moins éloigné du centre de ce disque, il reçoit, à chaque tour, une rotation plus ou moins rapide. Le maximum de rapidité s'obtient en plaçant le galet le plus loin possible de l'axe.

(2) Les rails *r r* sont formés de bandes de cuivre à arête pour avoir le maximum de rigidité. Des quatre galets du chariot *c*, deux sont portés par des ressorts élastiques, de sorte que les galets tendent sans cesse à s'écarter les uns des autres et pressent sur le tranchant des rails.

à toucher la surface enfumée, sans donner naissance à des frottements sensibles.

Les roues du chariot sont horizontales, et la gorge circulaire qu'elles portent reçoit l'arête des rails *r r* entre lesquels elles roulent, en exerçant une légère poussée latérale qui tient le chariot suspendu (1). Ce chariot curseur est fait en aluminium, afin d'offrir le moins possible d'inertie quand on lui imprime un mouvement rapide.

Tel qu'il vient d'être décrit, le curseur est susceptible de recevoir des mouvements dans les deux sens. Il s'agit de lui transmettre ceux que l'on veut étudier. La disposition la plus commode consiste dans l'emploi d'un fil qui tire le chariot dans un sens, tandis qu'un autre fil, attaché à un ressort antagoniste, exerce une traction de sens contraire (2).

On a déjà vu, fig.67, les effets de cette disposition qui permet de transmettre, au moyen d'un fil, un mouvement de va et vient. Elle est d'un emploi commode dans un grand nombre de cas.

Moyens d'amplifier ou de réduire le mouvement qu'on veut inscrire. — Lorsqu'il s'agit de réduire à la longueur du cylindre un mouvement de grande étendue, on se sert de poulies ou d'engrenages disposés de façon convenable. J'ai cherché, autant que possible, à réduire ou à amplifier les mouvements suivant des rapports simples : dix fois, cent fois, mille fois leur valeur réelle.

Enfin, quand le mouvement qu'on doit inscrire est très-faible, on l'amplifie au moyen d'un levier simple, ou du tambour à levier précédemment décrit. On l'inscrit alors directement sur le cylindre. Les dispositions à prendre,

(1) Pour rendre le chariot visible dans la fig 124, on a représenté le rail antérieur rompu à sa partie moyenne.

(2) Quand l'étendue des mouvements doit être considérable, on doit craindre que pour une excursion aussi grande, la force du ressort ne soit pas constante, ce qui troublerait les résultats. On se sert alors d'un contrepoids P pour ramener le chariot; mais afin d'empêcher les effets de l'inertie de ce contrepoids, on le dispose de manière à rendre sa vitesse presque nulle. La corde qui le supporte s'enroule autour de l'arbre même de la poulie *p* qui tire le fil du chariot. Si le diamètre de l'arbre est très-petit et celui de la poulie très-grand, le moment d'inertie du poids est négligeable, mais doit employer alors un poids assez lourd (200 ou 300 grammes quelquefois).

pour chacun des cas particuliers, seront exposés plus loin, à propos des applications de la méthode graphique à l'étude des mouvements de différentes natures.

V. — Application de la méthode graphique à l'étude des mouvements simples (rectilignes).

Expériences sur la chute des corps. — Vitesse des projectiles. — Partage des vitesses entre deux corps qui se choquent. — Durée des chocs. — Tracés des actes musculaires. — Accroissement de végétaux.

Parmi les nombreuses applications de la méthode graphique et des appareils décrits dans le précédent chapitre, je choisirai spécialement ce qui rentre dans le domaine de la physiologie. Je ne puis toutefois passer sous silence certaines expériences, physiques ou mécaniques, particulièrement aptes à faire ressortir la puissance de ces appareils.

Je mentionnerai tout d'abord la mémorable expérience de Poncelet et Morin sur la chute des corps, expérience par laquelle la méthode graphique est entrée dans la science.

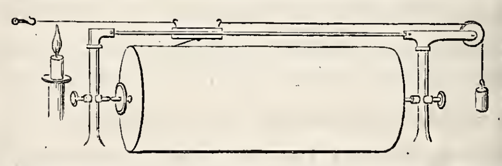


Fig. 125. — Disposition de l'expérience pour déterminer les lois du mouvement accéléré sous l'influence de la pesanteur ou d'autres forces constantes.

A) *Chute des corps.* — Pour répéter, avec l'appareil ci-dessus représenté, l'expérience sur le mouvement d'un corps qui tombe, il suffit d'attacher le corps pesant (fig. 125), à un fil inextensible qui se réfléchit sur une poulie et va s'attacher au chariot. Un autre fil partant du chariot se fixe à un crochet, maintenant à la fois le chariot immobile et le poids suspendu. On fait alors tourner le cylindre; une ligne circulaire se trace sur le papier, puis, quand le cylindre a pris sa vitesse, on fait écrire le chronographe, en même temps qu'on brûle le fil qui

retenait le chariot. Aussitôt le poids est livré à la pesanteur, et tombe en entraînant d'un mouvement accéléré le chariot dont le style trace sur le cylindre une courbe parabolique. Pour analyser cette courbe, le chronographe fournit les mesures du temps, pendant que les espaces se comptent sur une ligne verticale qu'on trace après coup, en faisant courir le chariot quand le cylindre est arrêté (1).

Le mouvement de la chute d'un corps n'a pas besoin d'être

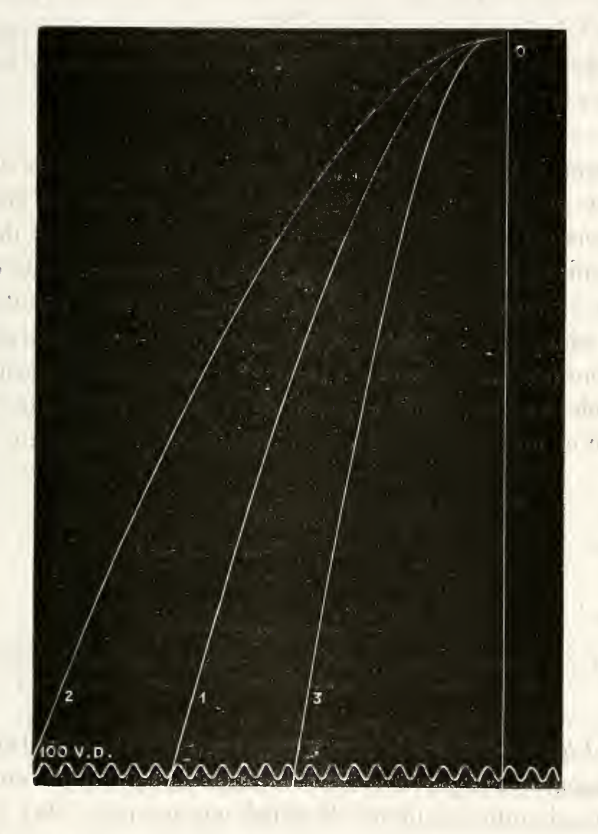


Fig. 126. — Courbe de la chute des corps. 1. Chute sous l'influence de la *pesanteur*. 2. Chute sous l'influence d'une force égale à la *moitié* de la pesanteur. 3. Chute sous l'influence d'une force égale *au double* de la pesanteur.

(1) Il est commode d'employer à cette expérience du papier quadrillé divisé millimétriquement, soit que la couche de noir de fumée très-mince laisse voir les divisions du papier, soit qu'on n'enfume pas le papier et qu'on se serve pour tracer d'une plume chargée d'encre.

inscrit dans une étendue considérable; si courte que soit la durée de la chute, elle suffit pour révéler la forme parabolique du tracé et pour montrer les lois des espaces et celles des temps.

La disposition représentée figure 125 peut être avantageusement modifiée en substituant au crochet qui retient le chariot et au fil qu'on brûle un électro-aimant qui, par une disposition fort simple, retient le fil jusqu'à la rupture d'un courant de pile. On peut faire arriver cette rupture à un même moment de la rotation du cylindre (voir les expériences décrites fig. 79) et alors on obtient, dans une série d'expériences consécutives, une série de courbes dont les origines sont toutes en un même point. C'est ainsi qu'a été obtenue la figure 126 avec ses trois courbes.

Courbe du mouvement produit par la pesanteur. — On place le cylindre verticalement et on maintient au moyen de l'électro-aimant le curseur chargé d'un poids. On fait tourner le cylindre, et quand il a pris sa vitesse, on rompt le courant de l'électro-aimant. Le poids tombe et trace la courbe 1, fig. 126, c'est la courbe classique des effets de la pesanteur.

Mais si l'on appliquait au chariot des forces plus grandes ou plus petites que la pesanteur, on aurait des accélérations plus grandes ou plus petites que celles que représente la courbe n° 1.

Courbe du mouvement produit par une force plus grande ou moins grande que la pesanteur. —La pesanteur, force constante, est assimilable à toute autre force de même caractère, par exemple à la traction d'un ressort dont l'élasticité ne changerait pas. On peut réaliser un ressort de ce genre. Un fil de caoutchouc de plusieurs mètres de longueur ne changera pas sensiblement de force élastique pendant le mouvement du chariot. Or, ce fil, on peut le tendre avec une force connue; il suffit de suspendre à son extrémité un poids convenable, 10, 100, 1,000 grammes, par exemple; le fil développera un effort de traction égal au poids dont il est chargé.

Supposons l'appareil placé dans la position représentée fig. 125 et suspendons le poids, non plus à un fil rigide

mais à un fil de caoutchouc très-long: si le poids pèse 100 grammes, le fil de caoutchouc qui le supporte développera nécessairement sur le chariot une force qui sera aussi de 100 grammes. Cette force imprimera au mobile des vitesses variables suivant la masse du mobile lui-même.

Si le chariot pesait 100 grammes, la traction du fil élastique lui imprimerait précisément la même vitesse que la pesanteur; mais si le chariot, au moyen de masses additionnelles, était porté au poids de 200 grammes, la traction du fil de caoutchouc ne lui imprimerait plus qu'une accélération deux fois moindre que celle de la pesanteur, c'est ce qui est représenté par la courbe n° 2.

Enfin, si le chariot allégé et réduit au poids de 50 grammes était sollicité par la traction du fil égale à 100 grammes, l'accélération serait double de celle que produit la pesanteur; c'est ainsi qu'a été obtenue la courbe n° 3.

La machine d'Atwood et le plan incliné de Galilée permettent de réaliser ce ralentissement de la chute correspondant à une diminution des effets de la pesanteur, mais je ne crois pas qu'on ait encore obtenu, comme dans la courbe 3, une chute plus rapide que celle que produit l'action de la pesanteur tout entière.

B) *Vitesse des masses en mouvement.* — On peut également, sur un petit parcours comme celui du chariot sur ses rails, déterminer la vitesse d'une masse en mouvement. On remplace alors le chariot par la masse elle-même qu'on munit de galets pour qu'elle glisse entre les rails et d'un style qui trace sur le papier. Puis, imprimant au cylindre une vitesse de rotation convenable que le chronographe contrôle, on donne à la masse l'impulsion dont on veut connaître les effets. Cette masse devient une sorte de projectile qui franchit la longueur du cylindre, en un temps plus ou moins long, et vient amortir sa vitesse contre l'obstacle placé à l'extrémité de sa course (1). Le tracé qu'on obtient est sensiblement une ligne droite, à

(1) On emploie avec succès la disposition suivante. Le mobile se termine par une pointe peu aiguë qui vient s'implanter, à la fin de la course, dans un morceau de bois tendre. Le mobile est ainsi arrêté sans choc et sans rétrogradation ni rebondissement.

moins que les frottements du chariot ne soient trop grands, ce qui altèrerait l'uniformité du mouvement. L'inclinaison de cette ligne mesure la vitesse du mobile.

L'un des phénomènes les plus intéressants qu'on puisse étudier par cette méthode, c'est la transmission du mouvement d'un mobile à un autre et la production des *chocs* dont on peut mesurer la durée.

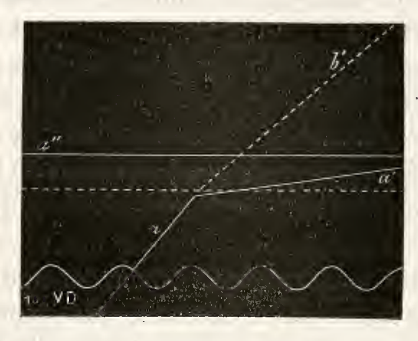


Fig. 127. — Rencontre de deux mobiles ; partage des vitesses ; durée du choc.

C) *Mesure de la durée d'un choc.* —Pour faire cette expérience, on prend deux mobiles pareils à celui qui vient d'être décrit plus haut ; tous deux d'égal poids et munis de galets. Placées sur le rail, ces masses portent chacune un style ; quant elles sont en contact, les styles ont leurs pointes très-voisines l'une de l'autre (1).

On place le mobile d'avant au milieu de la course à parcourir, tandis que le mobile d'arrière est placé sur une sorte d'arbalète qui le devra lancer à un moment donné. On imprime alors au cylindre une grande vitesse contrôlée par le chronographe. Le style du mobile d'avant trace sur le cylindre une ligne circulaire ; à ce moment, on presse sur la détente de l'arbalète et le 2e projectile est lancé. Le choc a lieu, le 1er projectile parcourt le reste du chemin, tandis que le 2e reste immobile au lieu où le choc s'est produit ; il trace alors une ligne circulaire. On arrête le cylindre et on recueille le tracé représenté figure 127.

(1) Pour obtenir ce résultat, on donne une grande longueur au style du mobile d'avant et une faible longueur à celui du mobile d'arrière. Les surfaces des mobiles qui doivent se choquer sont planes ou légèrement convexes.

Dans cette figure, la ligne oblique *a* est tracée par le mobile choquant; son inclinaison mesure la vitesse du mouvement de translation. La ligne horizontale *a''* est tracée par le style du mobile choquant lorsqu'il a perdu sa vitesse. La ligne horizontale ponctuée était tracée au commencement de l'expérience par le mobile d'avant; celui-ci, après le choc, a tracé la ligne oblique *b'*.

On voit que ces deux lignes obliques, droites et sensiblement parallèles l'une à l'autre, expriment que le mouvement de chacun des mobiles était uniforme et que le corps choquant a transmis la presque totalité de son mouvement au corps choqué. Après la rencontre, le mobile choquant n'a plus eu qu'une faible vitesse *a'* qui s'est éteinte bientôt (1).

Quant à la durée du choc, elle se déduit de la distance horizontale qui sépare le point où s'arrête le mouvement du corps choquant de celui ou commence le mouvement du corps choqué. Dans cette figure 127, l'intervalle qui sépare le tracé de ces deux instants est d'une brièveté extrême; l'œil a peine à le distinguer et l'on voit aisément qu'il représente une étendue bien moindre que celle qui correspond à 1/500e de seconde mesuré au chronographe. Les expériences assez nombreuses que j'ai faites à ce sujet m'ont fait voir que dans le cas où deux masses de bronze se rencontrent, la durée du choc est inférieure à 1/25000 de seconde.

Quant au partage de la vitesse entre deux mobiles qui se choquent, elle n'est pas moins intéressante à étudier. Dans l'expérience précédente, les masses étant égales et l'élasticité des corps étant presque parfaite, la force vive passait presque tout entière de l'un à l'autre (2). Mais, au moyen de masses additionnelles qu'on fixe à l'un ou à l'autre des mobiles, par de fortes vis, on peut donner à l'un d'eux une masse double de l'autre; si le corps choquant est le plus lourd, les deux mobiles se mettent en marche avec des vitesses différentes. Dans le cas inverse, le corps choqué prend une vi-

(1) Cette conservation d'une partie de la vitesse de la première masse n'arrive qu'autant que les substances qui se choquent n'ont pas une élasticité parfaite.

(2) Le corps choquant ne parcourt plus après la rencontre qu'un espace de quelques millimètres et accomplit ce trajet avec une vitesse très-faible.

tesse moindre que celle qu'avait le corps choquant. Quant à la durée du choc, elle m'a semblé également brève dans tous ces cas, et presque inappréciable malgré l'extrême puissance des appareils (1). Ces expériences devront être répétées avec des vitesses plus grandes de rotation du cylindre et de translation des mobiles.

D) *Vitesse des actions musculaires.* — Parmi les expériences qu'on peut faire sur les mouvements rapides, il en est une, fort intéressante pour la physiologie ; c'est la mesure des vitesses des actes musculaires.

Remplaçons le chariot qui sert aux expériences délicates par un mobile léger glissant entre les rails et muni d'un style; attachons à ce mobile une corde sur laquelle on exercera une traction plus ou moins brusque ; ce mouvement entraînera le curseur en dehors des limites de la longueur du cylindre, et une ligne sera tracée pendant le parcours du mobile sur les rails.

Or, cette ligne représentera un mouvement accéléré dont la rapidité variera beaucoup suivant le sujet qui fait l'expérience (2). Il semble que la rapidité du mouvement que produit le bras d'un individu ne soit pas en proportion du développement musculaire, mais dépende de certaines qualités spécifiques de ses muscles : qualités qui se traduisent par une plus ou moins grande brusquerie d'action et dont nous verrons de remarquables exemples, quand nous comparerons la rapidité du mouvement produit par les muscles des oiseaux avec la lenteur que donnent ceux de la tortue.

Quant aux mouvements faibles et rapides que produisent les muscles de petits animaux : les lapins, les rats, les grenouilles, il est préférable de les amplifier pour les inscrire ; il sera question de ces mouvements à propos de l'emploi des leviers inscripteurs.

(1) Je n'ai pas terminé les recherches relatives à la durée des chocs, suivant les vitesses imprimées aux mobiles, et suivant la forme et l'élasticité des surfaces de contact; ce sera l'objet d'études ultérieures.

(2) Il faut avoir soin que la corde soit bien tendue; sans quoi, au moment de sa tension soudaine, il se produirait un choc qui altérerait la forme du mouvement tracé.

E) *Accroissement des végétaux.* — Nous avons examiné les principaux cas où la méthode graphique se prête à l'inscription de mouvements très-rapides ; pour compléter l'exposé de ses applications, nous la montrerons aux prises avec des mouvements d'une grande lenteur. L'accroissement des végétaux est un des exemples les plus frappants qu'on puisse choisir.

Le 21 juillet 1873, je choisis une tige de *Polonia* dont la hauteur était de 1 m. 40, et, l'appliquant contre un solide tuteur, j'attachai à l'aisselle d'une des feuilles les plus hautes un fil dont la traction agissait sur un style écrivant (1). L'appareil, après avoir fonctionné deux jours et deux nuits consécutivement, donna le tracé fig. 128. On remarque, au premier

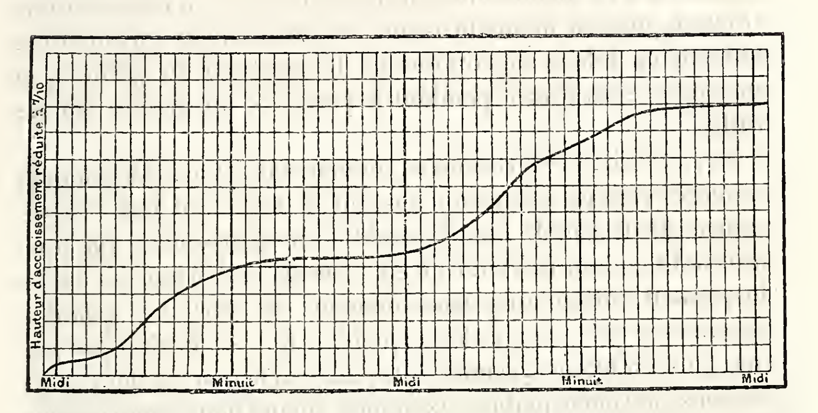


Fig. 128. — Courbe de l'accroissement d'un végétal.

abord, que l'accroissement de l'arbre avait son maximum entre midi et minuit. La période du tracé qui répond à la matinée est sensiblement horizontale, pendant une grande partie de son étendue. J'ai pu me convaincre que les variations de température n'influaient pas d'une manière sensible sur la longueur du fil et par conséquent sur la forme du tracé. Enfin, pour me mettre à l'abri des influences hygrométriques, j'ai employé un fil de métal pour transmettre la traction de l'arbre au style.

(1) La disposition de l'appareil était un peu différente de celle qui consiste à agir sur un curseur roulant sur des rails ; c'est à ce dernier appareil que je recours aujourd'hui dans de nouvelles expériences.

D'autres expériences, faites sur la même plante, m'ont donné des résultats concordants. Je regrette de n'avoir pu jusqu'ici opérer sur plusieurs espèces végétales, en variant les conditions hygrométriques et la température ; en plongeant la plante dans la lumière et dans l'obscurité ; en la placant dans des atmosphères de différentes compositions ; enfin, en faisant agir sur elle des faisceaux lumineux diversement colorés. Il y a là, sans doute, un vaste champ à explorer pour la physiologie végétale et si j'indique, dès aujourd'hui, les résultats encore informes que m'ont donné ces expériences, c'est avec l'espoir de voir ces recherches reprises par d'autres physiologistes plus préparés que moi à les poursuivre (1).

Moyen de réduire les mouvements qui sont trop étendus pour pouvoir être inscrits avec leurs dimensions réelles. — La longueur des cylindres dont on se sert pour inscrire les tracés est ordinairement de 25 à 30 centimètres ; quand le mouvement qu'on étudie n'excède pas ces dimensions, on peut, comme dans les expériences qui précèdent, l'inscrire directement, de façon qu'un centimètre de longueur, mesuré sur le papier parallèlement à l'axe des ordonnées, exprime un centimètre de chemin parcouru. Mais s'il s'agit de mouvements très-étendus, il faut les réduire dans des proportions connues : au 10e, au 100e, au 1000e, etc, suivant le besoin. On règle, en même temps, la vitesse de rotation du cylindre, pour que le tracé présente la clarté convenable.

La réduction du mouvement se fait au moyen de poulies ou d'engrenages agissant comme dans les compteurs, c'est-à-dire de façon que, dans la série des rouages, un pignon d'un certain nombre de dents agisse sur une roue dont les dents soient 10 fois plus nombreuses. Dans ces conditions, pendant que le premier mobile fait 1000 tours le second n'en fait que 100 ; le troisième 10 ; le quatrième, 1 ; le cinquième, 1/10e de tours seulement et ainsi de suite.

Tous ces mobiles, saillants à l'extérieur du rouage, peuvent

(1) On trouve dans Sachs, *Physiologie végétale*, des expériences analogues faites au moyen d'un simple levier amplificateur de mouvement. Cette disposition que j'avais employée d'abord m'a paru défectueuse, attendu que l'arc de cercle tracé par la pointe écrivante déforme trop le mouvement.

recevoir des poulies à gorge. Une corde enroulée sur l'une des poulies transmet au rouage le mouvement qu'il s'agit de réduire. Un fil enroulé dans la gorge d'une autre poulie transmet au style inscripteur le mouvement convenablement réduit.

Comme exemple d'inscription de mouvements réduits, je citerai des expériences faites sur la locomotion humaine, et dans lesquelles il s'agissait d'inscrire les mouvements du pied, lorsqu'il quitte le sol pour aller prendre un nouvel appui.

F) *Expériences sur les mouvements du pied dans la marche et la course.* — On attache à son pied un fil qui s'enroule sur une poulie placée sur le premier mobile du compteur ; une autre poulie, placée sur le troisième mobile, porte aussi un fil qui tire sur le style écrivant déjà décrit fig. 124. On obtiendra des tracés dans lesquels l'espace parcouru par le pied sera transmis au style, après avoir été réduit au centième de son étendue réelle.

La fig. 129 montre cinq tracés recueillis avec des allures inégalement rapides. A correspond à la marche la plus lente; B à la marche ordinaire ; C à la course rapide. Les autres courbes sont obtenues avec des courses de moindre vitesse.

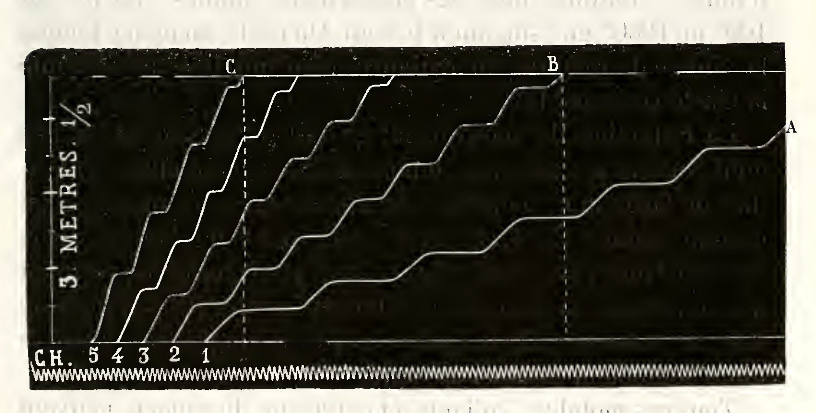


Fig. 129. — Mouvements d'un des pieds à différentes allures

L'*espace* total parcouru était 3 mètres 1/2 qui, réduits au 100e, donnent 3 centimètres 1/2. Les *temps* employés à par-

courir cet espace, aux différentes allures, se mesurent sur l'axe des abscisses, au moyen du tracé d'un chronographe de dix vibrations doubles par seconde.

Ces tracés expriment tout ce qui est relatif au transport du pied dans la marche. Ils montrent le temps pendant lequel le pied est à l'appui ou au levé, le chemin parcouru dans ce dernier cas, et les phases du mouvement.

1° *Alternatives de repos et de mouvement du pied.* — Il est clair que partout où les tracés montrent une ligne horizontale, ces temps correspondent à l'appui du pied sur le sol et à son immobilité, puisque l'espace parcouru est nul. La durée de ces appuis décroît, comme on le voit, à mesure que l'allure s'accélère. Le temps pendant lequel le pied se déplace est indiqué par une ligne oblique dont la projection sur les ordonnées croît d'autant plus que l'allure est plus rapide. Cela prouve que la longueur du pas augmente en raison de la vitesse de l'allure.

On pourrait estimer avec précision les rapports de la vitesse à l'étendue du pas, les variations relatives de la durée des repos et des mouvements du pied, etc. ; mais je ne saurais ici m'appesantir sur ces détails ; le point essentiel à déterminer est le suivant :

2° *Nature du mouvement de translation du pied.* — Ce mouvement se traduit, presque dans son entier, par une ligne droite ; il est donc uniforme pendant presque toute sa durée ; les inflexions de la ligne, au commencement et à la fin, annoncent que, dans les allures rapides surtout, le mouvement du pied commence et finit par de courtes périodes de vitesse variable. On voit combien il s'en faut que l'oscillation de la jambe soit analogue à celle d'un pendule, comme l'avaient cru les frères Weber. Ces auteurs, en effet, croyaient que dans la marche, les oscillations de la jambe qui se déplace n'étaient dues qu'à la pesanteur.

Il ne faudrait pas, non plus, attribuer exclusivement à l'action des muscles de la jambe ce transport à peu près uniforme du pied ; on sait que, dans ce transport, deux causes distinctes interviennent :

D'une part, le mouvement angulaire que la jambe exécute autour de l'articulation de la hanche ;

D'autre part le transport horizontal du bassin lui-même, c'est-à-dire du point de suspension de la jambe, pendant qu'elle oscille.

On conçoit que, par la combinaison de ces deux influences, le mouvement du pied tende à l'uniformité; cela arrivera si les *minima* de vitesse du premier genre de mouvement correspondent avec les *maxima* du second. Il devenait donc très-intéressant de déterminer quel est le mouvement de translation du tronc à diverses allures. L'appareil précédemment décrit sert encore à cette détermination.

G) *Inscription de l'espace parcouru par le corps aux différentes allures.* — Une corde attachée à la ceinture transmettait à l'enregistreur le mouvement de transport du tronc. En opérant successivement à différentes allures, on obtient la figure 130, dont l'analyse donne des résultats assez importants.

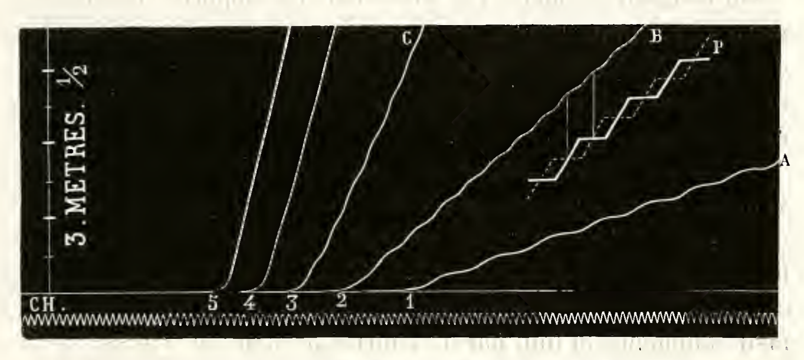


Fig. 130. — Vitesses de translation du corps de l'homme à différentes allures.

Vitesse de l'allure. — Elle est exprimée par l'inclinaison générale de la courbe, ou par la pente d'une ligne droite qui joindrait l'origine à la fin du tracé. Dans les différentes courbes rassemblées fig. 130, un même espace (3^m50), a été parcouru en des temps variables, que le chronographe permet de mesurer d'après le nombre de vibrations contenues entre l'origine de la courbe et son point d'arrivée projeté sur l'axe des X. Ainsi, pour la marche lente, de 1 en A, on compte 13 secondes ; pour la marche plus lente, de 2 en B, on en compte 6 1/2. Enfin, pour la course, de 5 en C, 2 secondes seulement.

Les ondulations de la ligne de marche sont beaucoup plus fortes dans le cas où la marche est lente que dans ceux où elle est plus rapide. Ainsi, le mouvement de translation du corps s'uniformise par l'effet de la vitesse (1).

Le nombre des saccades est double de celui des mouvements du pied dont la fig. 129 représentait les caractères. Cela se comprend aisément, puisque les deux pieds, répétant les mêmes actes, viennent, tour à tour, imprimer au corps une nouvelle impulsion.

Pour faire comprendre cette action, on a tracé parallèlement à la ligne 2 les courbes P des mouvements du pied droit et du pied gauche. Ces courbes, dont l'une est ponctuée et l'autre pleine, se reconnaissent facilement comme analogues de celles de la ligne 2 B, fig.129. Enfin, en observant la superposition des différentes parties de ces courbes avec les ondulations de la courbe de translation, on voit que le corps reçoit un surcroît de vitesse, vers le milieu de l'appui de chaque pied. Ce fait s'accorde avec les résultats que m'ont fourni d'autres expériences sur la locomotion humaine (2).

(1) C'est l'inverse de ce qui arrive pour les oscillations verticales du corps qui croissent, en raison de la vitesse de progression, avec la longueur du pas

(2) Voir *la Machine animale*, p. 127.

(*A suivre.*)

VIII.

RECHERCHES SUR LES NERFS VASCULAIRES DE LA TÊTE.

Par le Dr FRANÇOIS-FRANCK.

Suite (1).

---

f) *Nerfs vasculaires de la cavité orbitaire.*

Artère ophthalmique. — Les réseaux nerveux qui entourent la carotide se prolongent, comme on peut déjà le voir à l'œil nu, et comme le confirme l'examen microscopique, sur les branches de cette artère qui se ramifient dans le cerveau *et sur l'artère ophthalmique* (2). Les nerfs de cette dernière proviennent aussi en partie du plexus caverneux, et envoient un petit filet accompagner l'artère centrale de la rétine (3).

Ces nerfs de l'artère opththalmique viennent donc : 1° du plexus caverneux ; 2° du plexus carotidien proprement dit, et se distribuent avec les branches de l'artère ophthalmique.

Entre autres filets offrant de l'intérêt, on doit noter celui de l'artère centrale de la rétine, indiqué par Chaussier et Ribes (4), décrit de nouveau par Langenbeck.

Ce filet ne serait pas seul du reste à accompagner l'artère centrale du nerf optique : Ribes, en effet, en a décrit un autre, fourni, comme un nerf ciliaire, par le ganglion ophthalmique, et Tiedemann (5) a pu, chez le bœuf, suivre jusqu'à la rétine les filets réunis autour de l'artère (fig. 131). Mais, comme

(1) Voir mémoire V.
(2) *Encyclop. anat.*, t. IV, p. 579.
(3) Langenbeck (*Icon. Névrol.*), fasc. III, tabl. XVIII. Gœttingue, 1826, 1831.
(4) Ribes, *Mém. Soc. méd. d'émul.*, 1811, t. VII. — Langenbeck, *loco cit.*
(5) Tiedemann, *Journ. compl. de sc. méd.*, 13,25, t. XXIII.

le dit Valentin (1) : « On ne peut déterminer avec certitude si ces filets pénètrent dans la substance même de la rétine et s'anastomosent avec la couche de fibres primitives. »

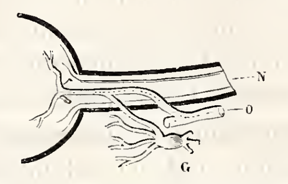


Fig.131. — Schema des filets nerveux accompagnant l'artère centrale de la rétine
O. Artère ophthalmique fournissant l'artère centrale de la rétine. — Ligne pointillée indiquant les filets nerveux sympathiques.
G. Ganglion ophthalmique fournissant un filet nerveux qui va se jeter sur l'artère centrale de la rétine.

Leur accollement à l'artère qui fournit les rameaux du fond de l'œil rayonnant autour de la papille ferait présumer qu'ils agissent sur le calibre de ces vaisseaux, au même titre que les nerfs ciliaires en général sur celui des vaisseaux de l'iris, et que les modifications dans la circulation rétinienne peuvent être elles-mêmes subordonnées, en qualité d'actes réflexes, à des influences multiples d'origine prochaine ou éloignée : peut-être, quelques amauroses ou amblyopies, dont la cause ne réside point dans une altération des éléments nerveux eux-mêmes, trouveraient-elles leur explication dans des troubles de l''innervation vasculaire retinienne.

Les variations du calibre des vaisseaux de la rétine doivent, en effet, exercer sur la fonction de cette membrane une influence dont leurs rapports avec les éléments fondamentaux (couche granuleuse interne et couche ganglionnaire) font pressentir toute l'importance; celle-ci est bien prouvée du reste par les effets de l'embolie de l'artère centrale de la rétine observée quelquefois chez l'homme. «Au moment de l'accident, la suspension brusque de la circulation amène la suspension subite de la vue. Le lendemain, la vue revient parce qu'il s'est établi (2) une suppléance de la circulation centrale par la circulation périphérique et collatérale... Mais bientôt, vu l'insuffisance de cette circulation supplémentaire, et peut-être

(1) Valentin, *Encycl. anat.*, t. IV, névrol.
(2) Th. Leber. Untersuch. über den Verlauf (*Arch. für Ophth.*, XI, 1).
Hugel Uber collat. Kreislauf (*Ibid.*, IX, 3).

aussi à cause d'une artérite locale développée autour de l'embolie... la nutrition de la rétine et surtout celle du bout intra-oculaire du nerf optique sont définitivement altérées (1)... »

Ce rapprochement entre l'anémie de la rétine par embolie de l'artère afférente et l'anémie par spasme vasculaire réflexe, est toutefois subordonné à la démonstration bien positive des filets vasculaires rétiniens. Cruveilhier considère leur existence comme problématique; le professeur Sappey aurait même acquis la certitude qu'ils n'existent pas. Je devais cependant les mentionner à cause de l'autorité des auteurs qui les ont décrits.

Les autres branches de l'ophthalmique destinées au globe de l'œil sont les *ciliaires :*

Les ciliaires courtes (*uvéales* de Chaussier) vont à la choroïde et aux procès ciliaires.

Les ciliaires longues (*iriennes*, Chaussier) abordent l'iris par sa grande circonférence, forment d'abord le grand cercle artériel, puis, près de l'anneau pupillaire, le petit cercle artériel.

Les ciliaires antérieures, fournies par les musculaires, relient les courtes ou choroïdiennes aux longues ou iriennes dans l'épaisseur du muscle ciliaire ou de Brücke. La circulation artérielle se trouve ainsi commune dans les deux membranes.

De plus, cette circulation artérielle intra-oculaire communique avec la circulation superficielle du globe de l'œil par les branches scléroticales et conjonctivales des ciliaires antérieures; cependant il est important, aussi bien au point de vue de la physiologie qu'à celui de la clinique, de noter que ces anastomoses n'empêchent point une indépendance réelle (2), et les cliniciens insistent avec raison sur la différence caractéristique de l'injection fine et profonde périkératique dans les affections cornéennes ou irido-choroïdiennes, et de l'injection large, superficielle, plus excentrique dans les conjonctivites. Nous aurons occasion d'appliquer ces notions anatomiques en étudiant la marche des désordres qui suivent les lésions expérimentales du trijumeau.

(1) A. Sichel, *in Arch. de physiol.*, 1872.

(2) Donders et van Varden, *Annal. d'oculistique*, 1854, et S. Duplay, *Path. externe*, t. IV.

L'innervation de ces artères est dévolue aux nerfs ciliaires, ainsi qu'aux filets sympathiques qui accompagnent les branches de l'artère ophthalmique, suivant ici la loi générale et n'abandonnant pas les rameaux des branches sur lesquelles ils sont appliqués, si tenus qu'on puisse les supposer.

Mais ce sont, disais-je, spécialement les nerfs ciliaires qui sont affectés aux artères intra-oculaires.

Ces nerfs forment deux catégories : les ciliaires courts et les ciliaires longs. Les premiers, correspondant aux artères ciliaires courtes ou postérieures, fournis par le ganglion ophthalmique, complexes par conséquent, participent aux propriétés des trois ordres de racines de ce ganglion.

Or, les racines sympathiques sont constantes, quoique variées dans leur origine, surtout dans leur trajet. Il est fort rare que le plexus caverneux n'en fournisse pas au moins une qui aborde le ganglion par son bord postérieur : on a décrit ce filet sous le nom de racine supérieure moyenne (1). Souvent aussi les nerfs sympathiques appliqués au côté externe de la carotide interne, envoient un rameau qui aboutit au même côté du ganglion ; mais ce dernier rameau se confond plus fréquemment encore avec la racine sensitive venant du nasal, et on a noté (2) que, quand le filet nasal se détachait de l'ophthalmique avant son entrée dans l'orbite, l'anastomose sympathique se faisait presque au niveau du ganglion de Gasser. Ce cas mène évidemment à celui où les racines sympathiques du ganglion ophthalmique ont paru manquer, et où cependant cet élément, accolé au nerf nasal, arrivait encore au ganglion.

Du reste, tous les nerfs moteurs ou sensitifs de l'orbite contiennent des rameaux sympathiques empruntés soit au plexus caverneux, soit au plexus carotidien, de sorte que, quelque irrégularité qu'on puisse observer au sujet des rapports du sympathique avec le ganglion, on est toujours sûr que cet ordre de racines ne fait point défaut.

(1) Arnold, *Icon. nerv. cap.*, tab. III.
Fœsebeck, *loco cit.*, tab. I.

(2) Hirzel, *Zeitschrifft für Physiol.*, t. I.
Müller (*Archiv.*, 1840), Sur nerfs accessoires et variés du ganglion ophthalmique.

Donc, au sortir du ganglion, les nerfs ciliaires ne peuvent manquer de renfermer des éléments sympathiques, et l'innervation des artères ciliaires est assurée de ce côté. Ces nerfs, en effet, traversent la sclérotique accompagnés d'artérioles, puis, cheminant comme celles-ci, entre la sclérotique et la choroïde, donnent de petits filets aux vaisseaux de cette dernière, forment un riche plexus dans l'anneau ciliaire, et, de même que les artères, constituent dans l'iris des arcades d'où partent des branches suivant la même marche que les vaisseaux sanguins.

Il est bien entendu qu'en me bornant à indiquer les rapports des nerfs ciliaires du ganglion ophthalmique avec les vaisseaux intra-oculaires, je ne prétends point qu'ils leur soient uniquedestinés. Bien loin de là, le muscle de Brücke, le dilatateur et le sphincter de l'iris, sont soumis à leur influence, comme le démontrent amplement et la clinique et l'expérimentation.

Quant au second ordre de nerfs ciliaires, les ciliaires longs, ils sont au nombre de deux ordinairement, proviennent du nerf nasal, en totalité ou en partie, quelquefois du nerf frontal ou du nerf lacrymal, et perforent la sclérotique, après s'être anastomosés avec quelques filets des ciliaires courts, surtout avec le filet supérieur et interne du ganglion ophthamique (1) ou avec un filet inférieur (2). Les rapports de ces nerfs ciliaires longs avec les vaisseaux intra-oculaires sont moins bien précisés que ceux des précédents, mais, comme eux, ils aboutissent à l'anneau ciliaire, dans la partie musculaire duquel ils contribuent à former le plexus nerveux que j'ai indiqué tout à l'heure.

C'est de ce plexus, contenant de nombreuses cellules nerveuses (3) (ce qui, sans doute, a fait décrire à Sœmmering le muscle ciliaire sous le nom de (*annulus gangliformis*) que partent les réseaux nerveux si serrés de l'iris. — La terminaison précise de ces filets est encore inconnue (4).

Mais leur rapport intime avec les fibres musculaires ra-

(1) Valentin (*Névrologie*).

(2) Cruveilhier (*Anat. desc.*, t. III).

(3) Sappey (*Névrol.* 1872) rappelle que Krause et Muller y ont confirmé l'existence de cellules ganglionnaires.

(4) Cruveilhier, *Anat. desc.*, t. III.

diées qui forment le muscle dilatateur de la pupille, *aussi bien qu'avec la paroi des vaisseaux de l'iris*, n'en est pas moins admis en physiologie.

La démonstration expérimentale en a été donnée par Cl. Bernard, et, à peu près à la même époque, par Budge et Waller (1851), dont les recherches sont connues de tout le monde, et ont été répétées, toujours avec le même succès, par une foule de physiologistes. — La section du sympathique au cou, et la destruction du centre cilio-spinal, ont amené, en même temps que des phénomènes de vascularisation étendus au reste de la tête, le rétrécissement de l'iris et la dilatation des vaisseaux de cette membrane, de la conjonctive, etc. Il résulte de ces faits, que les fibres radiées de l'iris, et *les fibres musculaires des parois vasculaires* (1), empruntent leurs nerfs moteurs au cordon cervical du sympathique, qui lui-même les a reçus de la moelle par les racines des 3 premiers nerfs dorsaux; et, pour préciser davantage, les filets iriens proprement dits passent dans le cordon sympathique par les racines des 2 premières paires dorsales, les filets vasculaires par les racines de la 3ᵉ (Cl. Bernard).

Mais il ne suit pas de là que les nerfs vasculaires de l'œil proviennent tous de la région de la moelle désignée sous le nom de cilio-spinale (R. Wagner) (2). — Le bulbe (Schiff) (3) en fournit aussi un certain nombre qui suivent le trijumeau (nerfs ciliaires du nasal, par exemple, et racine longue du ganglion ophthalmique ; de là sans doute l'existence admise par Budge (4) d'un autre centre cilio-spinal, le centre bulbaire. *Ainsi les nerfs vasculaires du globe de l'œil lui sont apportés des centres soit par le sympathique isolé (racines du gan-*

(1) Les variations produites dans le calibre des vaisseaux de l'iris suffiraient pour expliquer les modifications du diamètre de la pupille. Les agents qui produisent le resserrement des vaisseaux font dilater la pupille ; ceux qui amènent de la dilatation vasculaire font resserrer l'iris. Des expériences ont du reste montré à Brown-Séquard la réalité de cette influence : un lapin, par exemple, étant suspendu par les membres postérieurs, les vaisseaux céphaliques se dilatent passivement par l'effet de la pesanteur, et l'iris se contracte. Ce serait, en définitive, des changements de volume de ce tissu érectile qui produiraient ou la dilatation ou le resserrement de l'iris ?

(2) R. Wagner (*Mém. sur les nerfs mot. de l'iris. — In Ann. sc. nat.*, 1853).

(3) Schiff. *Untersuch. für Phys. der Nervensys.* —Frankfurt am n. Mai 1855.

(4) Budge (*Compend. de Physiol.*, p. 472).

glion ophthalmique, et filets entourant les artères), soit par le trijumeau.

Les phénomènes qui suivent immédiatement les sections du trijumeau (1) semblent donc pouvoir être rapportés à la suspension d'action des fibres vaso-motrices contenues dans ce tronc nerveux. Mais quand il s'agit d'interpréter les troubles de nutrition consécutifs, on hésite à les faire d'emblée remonter à la même cause. Nous ne devons cependant point oublier que les altérations graves du globe oculaire ont été notées à la suite d'hémisections du bulbe (2), à la suite de lésions de la moelle dans la région cervico-dorsale (3), c'est-à-dire après lésions des centres d'origine des nerfs vasculaires de l'œil. Dès lors les sections du trijumeau pourraient produire les désordres nutritifs du côté de l'œil par la section simultanée des fibres vaso-motrices : quand la section porte sur le ganglion de Gasser ou au delà du ganglion, d'une part elle supprime un plus grand nombre d'éléments vasculaires à cause des anastomoses qui se font en ce point (V. S.), d'autre part, les désordres sont activés et plus considérables parce que les filets nerveux séparés du ganglion s'altèrent, comme Waller l'a démontré pour les nerfs spinaux. — Sans doute il faut faire, dans la production de ces altérations consécutives, une large part à l'état général de l'animal, et Cl. Bernard a mis souvent ce fait en lumière ; il ne faut pas non plus négliger (4) l'anesthésie de la cornée et de la conjonctive, qui, ne sollicitant plus l'occlusion des paupières, laissent le globe de l'œil exposé aux influences extérieures, traumatiques ou autres. Mais là n'est point assurément la cause fondamentale des altérations consécutives à la section du trijumeau, car après la section du facial tout seul on ne les observe pas (5).

(1) Cl. Bernard (*Syst. nerv. pass.*).

(2) Schiff. Mémoire cité.

(3) Brown-Sequard (*Paraplégie*, 1864).

(4) Brown-Sequard, *J. Physiol.*, 1858, rappelle qu'il avait montré à Magendie que chez les grenouilles les yeux restaient à l'état normal tant que les animaux étaient tenus dans une atmosphère froide, humide et dans l'obscurité.

Et Snellen (*Rech. sur l'infl. des nerfs sur l'inflam.* (*Arch. f. d. Holl. Beitrage*, 1857) a vu l'inflammation de la cornée ne se produire que dans les yeux exposés au contact de l'air.

(5) Cl. Bernard, *Syst. nerv.*, t. II, p. 33.

L'ensemble des faits que je viens d'indiquer m'engagerait à incliner vers l'opinion développée par Schiff (1) que les altérations de l'œil dépendent surtout des dilatations paralytiques des vaisseaux de la conjonctive, de l'iris, etc. (2). Cette interprétation me paraît être également applicable aux troubles survenant dans la muqueuse nasale à la suite des mêmes sections expérimentales du trijumeau. L'écoulement observé dans ces conditions serait dû (3) à la dilatation paralytique des vaisseaux de cette membrane. Nous avons vu en effet (*Innerv. vasc. fosses nasales*) que le ganglion de Meckel envoie un grand nombre de filets se distribuant aux artères sphéno-palatines, palatine descendante, etc., comme le nerf ethmoïdal en fournit aux branches de l'artère correspondante.

La même explication rend compte de l'écoulement muqueux qui se fait par la commissure labiale après la section du trijumeau, et de la production des ulcérations des muqueuses labiale et linguale au niveau des points mordus par l'animal.

Une bonne raison pour mettre ces divers désordres oculaires, nasaux et buccaux, sur le compte de la dilatation vasculaire paralytique, c'est qu'on les observe encore à la suite de l'extirpation du ganglion cervical supérieur (4). Par cette opération que fait-on en effet ? On supprime l'influence sur l'appareil oculaire et la muqueuse nasale, des vaso-moteurs fournis par le sympathique cervical; on détruit les filets vaso-moteurs qui se rendent aux artères, soit en passant directement du ganglion sur leurs parois, soit en suivant les branches du triju-

(1) Schiff. *Mém. anal.*, par Brown-Sequard, *Journ. physiol.*, 58, 5e conclus., 1re partie. (*Physiol. dig.*, t. II, 42.)

(2) Le glaucome, attribué par de Græfe à une dégénérescence des parois vasculaires, par Donders, à une névrose des nerfs ciliaires, considérés comme nerfs sécréteurs de l'œil, semble pouvoir être déterminé par des lésions du sympathique et du trijumeau. Wagner a constaté que l'irritation du sympathique au cou produit l'augmentation de la tension intra-oculaire. Hippel et Grimhagen expliquent cette augmentation de tension par le rétrécissement des vaisseaux; de plus, ils ont vu se produire par l'irritation du trijumeau un véritable glaucome aigu. Or, nous savons que les vaisseaux intra-oculaires sont innervés par les nerfs ciliaires, formés eux-mêmes aux dépens du sympathique (plexus carotidien) et du trijumeau (racine du nasal). Duplay, auquel j'emprunte ces détails, admet, avec les auteurs cités, que l'irritation des nerfs ciliaires peut amener des processus glaucomateux.

(3) Milne-Edwards (*Anat. et Physiol. comparées.* — Circulation).

(4) Cl. Bernard (*Syst. nerv.*, t. II, p. 46).

meau auquel ces filets ont été amenés en grande partie par les anastomoses signalées.

Cette similitude entre les effets produits sur les vaisseaux par l'ablation du ganglion cervical supérieur et par les sections du trijumeau, se retrouve dans les effets produits sur l'iris. Les mêmes opérations s'accompagnent de rétrécissement pupillaire (1). Pouvons-nous expliquer cette concordance dans les résultats des expériences pratiquées sur les filets sympathiques isolés et sur le trijumeau, autrement qu'en admettant dans ce dernier des nerfs de même nature ?

Les troubles nutritifs sont donc liés aux troubles circulatoires, et l'influence des nerfs sur leur apparition s'exerce d'une façon indirecte, par l'intermédiaire des vaisseaux dont le calibre est modifié.

Nous avons vu pour les glandes, pour la sous-maxillaire, par exemple, l'activité sécrétoire (ou en d'autres termes la transformation des éléments cellulaires) liée à l'apport plus grand du sang dans le tissu ; cette activité fonctionnelle reste compatible avec l'intégrité de l'organe tant qu'elle ne dépasse pas la limite physiologique, tant qu'elle conserve son caractère normal d'intermittence ; mais, quand on la rend continue, la sécrétion prenant tout pour elle, l'organe ne répare plus ses pertes et s'atrophie graduellement. Ici, même enchaînement dans les phénomènes : la suspension de l'influence régularisatrice du système nerveux sur la circulation capillaire se traduit par des troubles nutritifs. J'admets donc l'intermédiaire vaisseau entre le nerf et l'élément, et j'avoue ne pouvoir comprendre autrement les désordres survenant du côté de l'œil, ou des autres organes, à la suite des sections du trijumeau (2), du bulbe (hémisection) (3), du centre cilio-spinal (4), après l'ablation du ganglion cervical supérieur (5) ; et je crois, après beaucoup d'autres, que les nerfs vasculaires constituent la très-grande majorité des nerfs trophiques de Samuel (6).

(1) Cl. Bernard, *ibid.*, p. 68 et *pass.*
(2) Magendie, Cl. Bernard, Schiff, etc., *loco cit.*
(3) Schiff, Untersuch., 1855.
(4) Brown-Sequard, *loco cit.*
(5) Cl. Bernard, *Syst. nerv.*, t. II, p. 46.
(6) Samuel, *Ein Beitr. z. Physiol. und Patho.*, Leipzig, 1860.

Je dis la très-grande majorité, car on peut objecter les cas d'atrophie musculaire à la suite de lésions des nerfs moteurs ou de la moelle, et son absence à la suite des sections du sympathique (Vulpian). Mais quand un nerf moteur est intéressé, il va dégénérant jusqu'à son appareil terminal, et l'élément musculaire, tout indépendante que puisse en être la contractilité, s'atrophie par défaut d'excitation fonctionnelle (1).

Quand les cornes antérieures de la moelle (2) subissent l'altération admise aujourd'hui comme déterminant la paralysie atrophique, ce n'est plus dans son trajet, c'est dans son origine médullaire que l'élément moteur est intéressé, et sa dégénérescence se produit comme dans les expériences wallériennes ; dès lors, les groupes musculaires correspondants subissent la conséquence de l'altération de leurs nerfs. Pour les muscles, créera-t-on des nerfs trophiques spéciaux ? Un nerf est trophique par rapport à son muscle, comme un amas de substance grise est trophique par rapport au nerf qui en reçoit son stimulant physiologique. Le muscle séparé de son nerf, le nerf séparé de son centre, dégénèrent chacun à sa façon.

Ce que je viens de rappeler pour les muscles est également vrai pour les téguments : la destruction d'un nerf sensitif affecte dans sa fonction et dans son existence le tégument, peau ou muqueuse dans l'épaisseur duquel ce nerf se divisait (3) ; le terrain est tout prêt pour qu'il s'y développe de graves désordres. Dans ce tissu, mort au point de vue fonctionnel, le sang circule en plus grande abondance que normalement, car

(1) L'hypoglosse a été paralysé, avant toute anastomose, par lésion du plancher du quatrième ventricule, dans les expériences de Vulpian et de Philippeaux : l'atrophie de la moitié correspondante de la langue a été la conséquence de cette suppression du nerf moteur. Même résultat avait déjà été obtenu par la section de l'hypoglosse sur son trajet.

Un blessé de Weir Mittchell (*Pensylvannia Hosp.*) eut le nerf hypoglosse coupé par une petite balle de pistolet. Comme dans le cas précédent, la moitié correspondante de la langue se paralysa et s'atrophia. Mais le toucher, la nutrition et la sensibilité de la surface muqueuse n'éprouvèrent pas d'altération. (Weir Mittchell, *Lésions des nerfs*, p. 34.)

(2) Laborde (*Paralysie infantile*).

Charcot (*Maladie du syst. nerv.* 72).

Dieulafoy (*Th. agrég.*, 1875).

(3) Weir Mittchell (*Lésions des nerfs*, page 35).

en même temps que la voie de transmission centripète, la section a interrompu une voie de transmission centrifuge : elle a soustrait les vaisseaux à l'influence régularisatrice de l'élé- vaso-moteur contenu dans le tronc nerveux.

Ceci s'applique complétement aux membranes extrinsèques du globe oculaire. Mais, dira-t-on, l'explication tombe en présence de l'observation si souvent faite par Cl. Bernard (1), qu'après la section du trijumeau la température baisse dans la moitié correspondante de la face ; tandis que l'inverse s'observe à la suite des lésions isolées du sympathique. A cela je pourrai répondre qu'il est peut-être insuffisant, comme le dit W. Mitchell, de juger de l'intervention ou de l'inertie des vasomoteurs par la température du tissu pris en masse.

La dilatation, qui est incontestable, porte sur une foule de petits vaisseaux, et le liquide interstitiel, dans lequel baignent les éléments anatomiques, s'accroît dans des proportions considérables : la cornée s'infiltre, devient nébuleuse ; l'humeur aqueuse distend la chambre antérieure de l'œil, et repousse en avant la cornée ; l'iris bombe et s'épaissit, s'infiltre lui-même ; à l'extérieur, la conjonctive forme un bourrelet, au centre duquel est enchâssée la cornée. Ces désordres, et bien d'autres, dénotent à n'en pas douter l'intervention vasculaire, et la relation de cause à effet entre la dilatation qu'on voit tout d'abord et ces exsudations multiples semble s'imposer jusqu'ici.

Quelle distance y a-t-il entre la série de troubles que je viens d'indiquer et les lésions ulcéreuses ? La conjonctive et la cornée sont insensibles, c'est déjà une raison pour qu'elles s'altèrent ; l'œil n'est plus protégé, l'animal n'éprouvant plus le besoin du clignement, et dès lors toutes les influences extérieures ont prise sur le tissu ; l'animal est le plus souvent affaibli par la reclusion, par l'abstinence ; et pendant ce temps-là, les tubes nerveux dégénèrent, séparés qu'ils sont du centre ganglionnaire. Toutes les conditions locales et générales, invidueIles et extérieures, s'ajoutent donc les unes aux autres pour entraîner les accidents ultérieurs, perforation de la cor-

(1) Cl. Bernard (*Syst. nerv. — Exp. sur Trijumeau. — Exp. sur sympathique*).

née, fonte purulente de l'œil. Mettez à temps l'animal dans de meilleures conditions, fermez son œil par un procédé quelconque, alimentez-le avec soin: s'il a été choisi bien portant et vigoureux, il est possible, comme l'a vu Cl. Bernard, que tout se borne aux premiers symptômes, et que les accidents rétrogradent assez vite. Du reste, chez les cobayes auxquels on a réséqué le sciatique et lié les gros troncs veineux du membre postérieur, on arrive, avec certaines précautions, à empêcher les accidents ulcéreux de se produire, et je ne doute pas que les ulcérations de la langue et des lèvres ne fassent défaut chez les lapins auxquels le trijumeau a été sectionné, si on prend soin de leur limer les dents.

Ainsi, tout en tenant grand compte de la prédisposition aux troubles nutritifs de la part du tissu (muscle, peau ou muqueuse) qui cesse de fonctionner à la suite de la section des nerfs, tout en accordant une influence réelle aux conditions de milieu, aux influences générales, il semble qu'on doive reconnaître pour cause prochaine, aux altérations qui surviennent du côté de l'œil après section du trijumeau, la dilatation vasculaire par section des vaso-moteurs que contient le nerf. Enfin, je crois que nous pouvons nous dispenser de répéter avec Duchenne, à propos des nerfs trophiques : « Si nous ne connaissions pas de tels nerfs, nous serions obligés de les inventer. »

Les travaux qui ont trait à cette question de l'influence nutritive des nerfs sont nombreux, et, sauf pour quelques-uns dont la mention a échappé aux recherches de M. Mougeot, cet auteur en a donné un exposé complet (1). Depuis l'époque où ce travail a été publié et analysé par M. Robin lui-même dans son journal, la question n'a guère changé de face, et c'est toujours le même ordre de discussions que l'on retrouve entre les partisans de l'influence nutritive directe, s'appuyant au besoin sur les notions anatomiques douteuses de Pflüger (V. nerfs glandulaires), et ceux qui n'admettent cette influence que par l'intermédiaire de la circulation (2).

(1) Mougeot (*Troubles de nutrition consécutifs aux altér. des nerfs*, 1867).
(2) Béraud (*Physiol.*, 1re édit., 1853. — 2e édit., 1856).
Robin, même ouvrage et tableaux d'anat., 1850.
Brown-Sequard (*Comptes rendus et Mém. Soc. de Biolog.*, 1849 et 1850).
Schiff (*Gaz. méd.*, 1854).

g) Nerfs vasculaires des parties molles intra-orbitaires.

Glande lacrymale. — L'artère lacrymale, fournie le plus souvent par l'ophthalmique, mais empruntant toujours au plexus du tronc dont elle émane des filets nerveux sympathiques, arrive à la glande après avoir quelquefois donné une artère ciliaire longue. Elle abandonne à la glande principale un certain nombre de branches, et en sort pour se terminer dans la conjonctive et la paupière supérieure. Là encore elle fournit des rameaux artériels aux glandes lacrymales accessoires. (*V.* fig. schématique générale 106.)

Le nerf lacrymal suit le même trajet, et affecte la même distribution que l'artère correspondante et donne quelquefois comme elle un nerf ciliaire long, destiné à l'iris et à la cornée (il est à remarquer que ce filet ciliaire n'existe que quand l'artère lacrymale fournit une artère ciliaire). Le nerf s'anastomose avec les rameaux malaires, avec les branches du frontal et du temporal superficiel.

Mais, malgré toutes les recherches que j'ai pu faire à ce sujet, je n'ai vu mentionnés nulle part des filets du lacrymal se portant sur les branches correspondantes de l'artère, et, tout en insistant sur l'identité du trajet et de la distribution de ces deux éléments vasculaire et nerveux, je ne puis préciser entre eux de rapports directs comme il en existe pour les nerfs vasculaires indiqués jusqu'ici.

Faute d'une notion anatomique exacte, trouverons-nous dans les recherches physiologiques des raisons suffisantes pour nous permettre d'indiquer la distribution vasculaire du nerf lacrymal ?

Je ne connais pas d'expériences ayant porté directement sur le lacrymal au point de vue de ses rapports avec la circulation glandulaire, et partant la sécrétion ; en analysant les lésions

Chauveau (*Infl. du syst. nerv. sur la memb.* Keratogène. Lyon, 1853).
Snellen (*Archiv. f. d. Holl. Beiträge. Heilkunde* von Donders, 1857).
Cl. Bernard (*Tissus vivants*, 1865).
Weir-Mittchell (*Lésions des nerfs*, 1874).
Charcot (*Lés. syst. nerv.*, 1872).
Vulpian (*Lec. vaso-moteurs*, 1874).

expérimentales du trijumeau pratiquées par Cl. Bernard, on arrive à cette conviction, que les nerfs sécréteurs de la glande lacrymale sont encore à trouver.

Essayons cependant de circonscrire la question dans la limite permise par les données que nous possédons.

La sécrétion lacrymale est continue à l'état de veille, et se produit évidemment sous l'influence d'un acte réflexe dont le point de départ le plus ordinaire est dans la conjonctive, la cornée, l'iris et la rétine. La conjonctive et la cornée impressionnées par le contact de l'air et les agents extérieurs, l'iris (1) et la rétine par la lumière, suscitent à l'état normal une sécrétion modérée lubréfiant le globe oculaire, et déterminent, par action réflexe, le clignement des paupières qui étend les larmes en même temps qu'il facilite leur passage dans le sac lacrymal (2). La sécrétion augmente quand l'incitation initiale est plus vive (corps étrangers, coryza).

Les filets sensitifs qui constituent la voie de transport de ces incitations vers le centre nerveux réflecteur font évidemment partie du trijumeau : la sécrétion lacrymale diminue après la section du tronc commun et de la branche ophthalmique (3); d'autre part, lorsqu'après l'opération pratiquée dans le crâne, « on voit la cornée conserver son aspect brillant, on peut « être à peu près certain que la 5e paire n'a été que contuse « ou comprimée et non complétement coupée (4). » Pour préciser davantage, ce sont les nerfs ciliaires, et les ciliaires indirects venant du nasal, quelquefois du lacrymal, qui transmettent les impressions de la cornée et de l'iris (5), et ce sont des filets du frontal, du nasal et du lacrymal qui constituent les conducteurs centripètes pour la conjonctive palpébrale et oculaire.

Le point de départ de la sécrétion lacrymale modérée ou intense est donc l'impression simple ou exagérée portant sur les filets conjonctivaux, cornéens ou iriens du trijumeau,

(1) Brown-Sequard, opérant sur des yeux d'anguille isolés, a montré l'influence de la lumière de l'iris (Cité par Cl. Bernard, *Syst. nerv.*, t. II).

(2) Richet (*Anat. chirurgic.*).

(3) Cl. Bernard (*Syst. nerv.*, t. II, p. 92).

(4) Cl. Bernard (*Syst. nerv.*, t. II, p. 78).

(5) Cl. Bernard (*Syst. n.*, t. II, p. 91).

quelquefois sur les filets de la muqueuse nasale fournis par le même nerf.

Dans d'autres circonstances les centres de réflexion seront impressionnés par des voies différentes (douleur physique, émotions morales vives), mais, pour rester dans les conditions de la sécrétion ordinaire, son point de départ nous paraît être dans les membranes extrinsèques ou intrinsèques de l'œil.

Jusqu'ici l'analogie est complète avec la sécrétion salivaire liée aux impressions de la muqueuse linguale. La section des troncs des linguaux et des glosso-pharyngiens (1), suspendant la transmission centripète, suspend en général la sécrétion sous-maxillaire réflexe. Mais, quand on cherche à pousser plus loin la comparaison, on est arrêté par l'ignorance des centres de réflexion et des voies de transmission centrifuge pour la sécrétion lacrymale. On pourrait supposer que le ganglion ophthalmique constitue un centre réflexe, et que les nerfs ciliaires directs et indirects anastomosés entre eux, lui apportent l'excitation périphérique ; mais par quels nerfs agirait ce ganglion sur la sécrétion lacrymale? Les filets qu'il fournit pénètrent dans le globe oculaire et n'ont d'action que sur l'appareil musculaire et vasculaire de l'œil. — Du reste cette hypothèse ne reposerait que sur une analogie reconnue entre le ganglion ophthalmique et le ganglion sous-maxillaire; or le rôle de centre attribué à ce dernier a été fort contesté, depuis que Schiff a indiqué des filets récurrents de la corde du tympan chez le chien. — Par conséquent, nous ne pouvons présenter le ganglion ophthalmique comme centre pour la sécrétion lacrymale, pas plus que l'élément moteur des nerfs ciliaires comme voie de retour.

En cherchant plus avant, nous ne trouvons que le centre bulbaire et les origines vaso-motrices qu'il renferme : là est peut-être le centre cherché. Il est possible en effet que l'impression normale ou exagérée retentisse sur le bulbe, et suspende dans son centre même l'activité vaso-motrice : les voies de retour sont alors toutes trouvées, elles sont multiples : les nerfs vaso-moteurs entourant les artères lacrymales nous sont déjà connus.

(1) Schiff (*Nerfs du goût. Physiol. de la digestion*).
Lussana. (*Arch. Physiol.*, 1872.)

Les excitations périphériques ou centrales n'activeraient les mouvements du cœur qu'en suspendant l'influence du centre vaso-moteur bulbaire (palpitations paralytiques) (1); de tous côtés on nous présente ce centre vaso-moteur bulbaire comme le grand régulateur de la circulation périphérique, et depuis Von Bezold jusqu'aux récentes expériences de Cyon, il n'est bruit que de sa prééminence absolue sur tous les actes circulatoires.

Ici, je trouve une question de détail inexpliquée, pouvant avoir sa raison d'être dans l'interprétation que j'invoque : je présente celle-ci, à titre provisoire, comme on doit toujours le faire en pareil cas. Vienne un physiologiste qui découvre pour la glande lacrymale un nerf analogue à la corde du tympan pour la sous-maxillaire, un filet dont l'excitation provoque la suractivité circulatoire et la sécrétion, je serai le premier à me ranger à son avis.

Ce serait alors la dilatation vasculaire déterminée par la suspension de l'influence vaso-motrice, qui, en laissant arriver à la glande une plus grande quantité de sang, activerait sa sécrétion.

Mais je prévois l'objection, que Cl. Bernard a maintes fois démontré et affirmé (2) que les sections du sympathique, tout en activant la circulation, ne déterminent pas la sécrétion. — A cela je répondrai que ces sections ne portent que sur quelques-uns des vaso-moteurs d'un organe, sur ceux qui lui arrivent par les vaisseaux, qu'on n'obtient ainsi qu'une partie des effets cherchés (3); que, quand on s'adresse directement aux centres, ou quand on interrompt par des sections intéressant aussi les nerfs cérébro-rachidiens (4) toutes les voies

(1) Notes de la clinique du professeur Sée, — mars 1875.

(2) *Liq. de l'org.*, t. II, p. 335.

(3) V. S. *Sécrét. saliv. et Nerfs rachid.—Exp. sur sciat. et racines.*

(4) Dans la section du trijumeau ou de l'ophthalmique ou des nerfs ciliaires indirects, le globe de l'œil est sec (V. S.), parce que l'incitation périphérique n'est plus transmise.

Au contraire dans les sections extra ou intra-crâniennes du facial, et dans les hémiplégies faciales chez l'homme, les larmes sont sécrétées en plus grande abondance. Il y a, je crois, à ce fait, une double raison : d'abord l'œil restant découvert, la cornée, la conjonctive, etc., subissent une impression exagérée et ininterrompue; comme cette fois-ci la transmission centrifuge s'opère, la sécrétion est augmentée; de plus, l'orbiculaire étant paralysé, l'appel des larmes dans le sac n'a plus lieu et l'épiphora en est la conséquence.

afférentes, les effets de dilatation vasculaire sont beaucoup plus marqués, et, qu'en définitive, c'est à la théorie de la suspension d'action vaso-constrictive que sont arrivés Cl. Bernard d'abord, Vulpian ensuite, à propos des nerfs dilatateurs.

Ici le nerf suspenseur de l'action vaso-motrice ne nous apparait point isolé comme pour la glande sous-maxillaire ; il est peut-être contenu dans le lacrymal lui-même, que nous considérons d'habitude seulement comme sensitif et vaso-moteur; mais s'il existe, en tout cas il n'agit point autrement que par dilatation vasculaire.

G) *Innervation vasculaire des parties molles intra-orbitaires.*

Le tissu cellulo-adipeux qui s'insinue dans tous les interstices laissés libres dans la loge postérieure de l'aponévrose orbito-oculaire. est traversé par de nombreux vaisseaux artériels et veineux qui le transforment en un véritable tissu érectile, car ses variations de volume sont liées au changement de calibre des vaisseaux qui le sillonnent en tous sens. Un effort qui pousse du sang artériel à la périphérie et y retient du sang veineux, augmente mécaniquement le volume de ce coussinet graisseux qui repousse l'œil en avant ; puis, quand cesse l'effort, quand la pression sanguine diminue dans l'orbite comme dans les autres régions périphériques, l'œil reprend sa place, n'étant plus projeté.

On sait quel cachet spécial donne à la physionomie cette saillie des globes oculaires dans la dyspnée un peu intense, dans la période tonique de l'attaque d'épilepsie. Dans ces cas, l'augmentation de volume des paquets adipeux intra-orbitaires, et la saillie des yeux qui en résulte, sont de cause mécanique : l'augmentation de la pression sanguine agit en dilatant de vive force les parois vasculaires, et ces dilatations, portant sur un bouquet vasculaire considérable, s'ajoutant les unes aux autres, produisent en définitive l'exophthalmie à des degrés variables.

Si maintenant on cherche à se rendre compte de la saillie du globe oculaire qui se produit d'une manière constante aussitôt après la section du trijumeau, on voit qu'on peut l'attribuer

à l'augmentation de volume du tissu cellulo-graisseux intra-orbitaire par dilatation vasculaire, celle-ci étant due à la section d'un grand nombre de filets détachés des branches de l'ophthalmique et se jetant sur les vaisseaux.

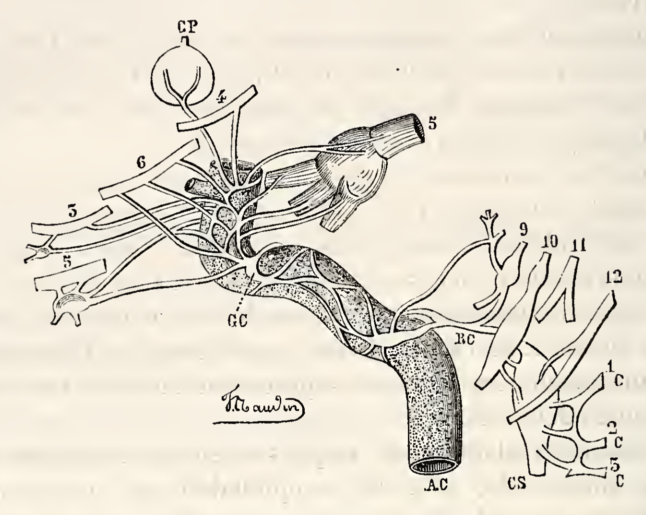


Fig. 132. — Schema indiquant les rapports :

1° Du ganglion cervical supérieur (CS) avec les 3 premières paires cervicales (1 C, 2 C, 3 C) et les nerfs crâniens (12) grand hypoglosse (10), pneumo-gastrique.

2° Du rameau carotidien RC avec le glosso-pharyngien (9).

3° Des plexus carotidiens et caverneux appliqués sur la carotide AC avec les nerfs moteur oculaire commun (3), pathétique (4), trijumeau (5), moteur oculaire externe (6).

CP Corps pituitaire et branches de communication avec le plexus caverneux.

GC Ganglion carotidien.

Nous savons (*fig.* 132) que le tronc du trijumeau, le ganglion de Gasser et ses branches, ces dernières surtout à leur origine, reçoivent de nombreuses anastomoses du plexus carotidien, et que d'autre part le trijumeau emprunte directement, selon toute probabilité, des éléments vaso-moteurs au bulbe rachidien.

Dans l'orbite, chacun des rameaux de la branche ophthalmique fournit des filets aux vaisseaux voisins.

Le nerf nasal (1) avant sa division « communique avec les

(1) *Encyclop. anat.*, t. IV, p. 302. Trad. Jourdan.

filets sympathiques venant du plexus carotidien qui entourent l'artère ophthalmique. »

Le nerf nasal externe (sous-trochléaire) donne des filets déliés à la graisse de l'orbite et aux vaisseaux qu'elle contient (1). Il en est de même du nerf frontal, soit avant, soit après sa division.

Quant au nerf lacrymal, que nous avons étudié tout à l'heure, nous avons vu qu'on ne lui signalait pas de filets vasculaires.

Les nerfs ciliaires fournissent enfin des filets très-déliés pour la graisse voisine et ses vaisseaux (2).

Ainsi les sections du trijumeau produiront la dilatation vasculaire en dehors de l'œil tout aussi bien qu'à son intérieur, et de cette dilatation des vaisseaux intra-orbitaires et intra-oculaires, résultera nécessairement un afflux sanguin considérable, avec augmentation de volume de tout le contenu de la cavité orbitaire. Ici l'afflux du sang est de cause périphérique : c'est une lésion nerveuse, une suppression d'activité vaso-motrice qui la détermine.

Il est une maladie dont la physiologie pathologique est encore incomplète, le goître exophthalmique, mais dans laquelle il est possible de retrouver, pour expliquer l'exophthalmie, les deux ordres de causes que je viens d'indiquer : l'augmentation de la pression intra-vasculaire et la dilatation paralytique. Le plus souvent, je crois, ces conditions, différentes dans l'origine, identiques dans l'effet, s'ajoutent l'une à l'autre pour produire l'exophthalmie. L'hypertrophie du cœur, constante ou à peu près, explique l'augmentation de la pression ; les troubles d'innervation vaso-motrice, liés quelquefois à la dégénérescence des ganglions cervicaux (3), rendent compte de la facilité avec laquelle les vaisseaux orbitaires, qui reçoivent une grande partie de leurs nerfs du plexus carotidien, se laisseront distendre même avec une impulsion cardiaque normale.

Mais si cette interprétation peut s'appliquer aux cas où les cliniciens ont cru devoir considérer la maladie de Graves comme une névrose sympathique, et à ceux où on a noté des

(1) Bock (*Fuenftes Nervenpaar*, tab. II. — Weber, *loco cit.*, tab. VIII).

(2) *Encyclop. anat.*, t. V, 287.

(3) Trousseau, Clinique.

altérations ganglionnaires, elle n'est pas suffisante quand on rencontre une lésion valvulaire du cœur. Ce serait sortir de mon sujet que de dépasser cette limite, car je ne dois insister que sur les variations circulatoires en rapport avec l'innervation vasculaire.

Pour terminer la question de l'innervation des vaisseaux de l'orbite, je crois devoir marquer ici la place d'un fait connu de tous les physiologistes, et souvent mis à profit par les littérateurs quand ils nous dépeignent les yeux comme le miroir de l'âme ; ce fait, dont la clinique tire aujourd'hui grand profit pour le diagnostic des lésions encéphaliques, se résume en ceci : communauté d'origine des vaisseaux de l'œil et du cerveau, communauté d'innervation vaso-motrice. Il est inutile d'insister sur l'immense portée de cette notion ; j'aurai du reste lieu d'y revenir en étudiant les variations circulatoires intra-crâniennes.

Innervation vasculaire des régions superficielles du crâne. Pavillon de l'oreille.

Les artères auriculaires antérieures sont fournies par la temporale superficielle, et les postérieures par l'auriculaire de la carotide. Les unes et les autres communiquent soit par des branches perforantes, soit par des anses qui contournent le bord libre des cartilages.

Les nerfs se distribuant à ces artères forment quatre groupes (fig. 133) :

1° Le groupe sympathique (S) qui provient du plexus entourant l'artère carotide externe et par conséquent du ganglion cervical supérieur ;

2° Le groupe cervical (B r c) : le grand nerf auriculaire du plexus cervical, venant surtout du troisième nerf cervical (branche antérieure), se distribue, en s'anastomosant avec le facial et le temporal superficiel à la face postérieure du pavillon de l'oreille ; sur son trajet, il fournit aux vaisseaux de cette région.

A son sujet je rappellerai que M. Armand Moreau, repre-

nant des expériences maintes fois répétées depuis Snellen, est arrivé aux résultats suivants : il a vu que la section du nerf auriculaire cervical produisait sur les vaisseaux de l'oreille le même effet que la section du filet sympathique cervical, fait déjà observé par Schiff ; de plus, il a pu déterminer chez le lapin la région vasculaire sur laquelle agit ce nerf (1).

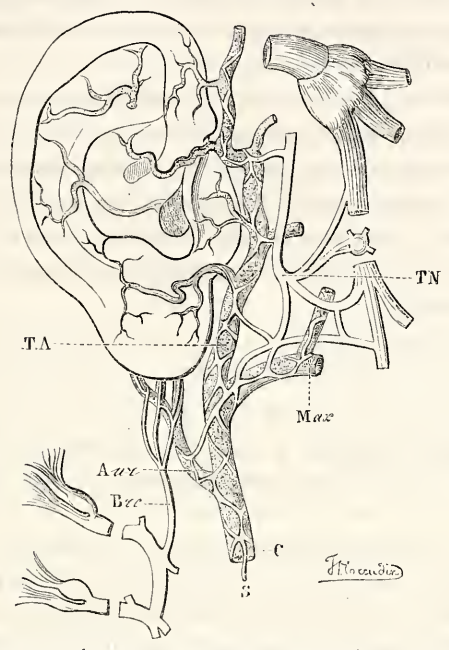


Fig. 133. — Schema des nerfs vasculaires du pavillon de l'oreille. — C, artère carotide avec plexus carotidien S, se continuant sur la temporale TA, et la maxillaire interne *Max*, l'auriculaire poster *Aur*, et s'unissant sur les vaisseaux du pavillon de l'oreille avec les branches du nerf temporal superficiel TN et du nerf auriculaire du plexus cervical *Brc*.

Cette similitude entre les effets de la section d'un nerf rachidien et ceux de la section du sympathique libre sur les vaisseaux d'une région s'explique, comme nous l'avons vu (*nerfs rachidiens*), par la présence de filets sympathiques dans les racines du nerf mixte ;

(1) A. Moreau (*Archiv. Physiol.*, 1872, p. 667) a observé, comme résultat constant, que les vaisseaux de la partie supérieure de l'oreille externe se dilatent après la section du nerf auriculaire cervical, tandis que ce sont ceux de la base qui restent dilatés après la section du sympathique ; de sorte que, pour avoir la dilatation vasculaire aussi complète que possible, il faut sectionner les deux nerfs.

3° Le groupe facial : le rameau auriculaire antérieur du facial participe directement à l'innervation vasculaire du pavillon de l'oreille ; en outre, ce nerf s'anastomose avec le plexus du nerf suivant ;

4° Le groupe auriculo-temporal : les racines de l'auriculo-temporal (A T, fig. 133) forment entre elles et avec des filets anastomotiques du facial, de la corde du tympan (V. Nerfs parotidiens) un plexus situé sur l'origine de la temporale et de la maxillaire interne.

De ce plexus (1) partent en tous sens une multitude de ramifications dont les unes sont des filets destinés aux nombreuses artères du voisinage ; entre autres, « le nerf supérieur du conduit auditif, anastomosé d'abord avec les nerfs mous de l'artère auriculaire profonde, se divisant ensuite en trois filets dont l'inférieur donne de nombreux ramuscules aux branches de la même artère (2). »

Les branches postérieures du plexus auriculo-temporal sont donc surtout destinées aux artères auriculaires profondes.

Les artères auriculaires antérieures reçoivent leurs nerfs des branches ascendantes du même plexus, et de plus, le nerf auriculaire superficiel qui s'en dégage, montant le long de la temporale, distribue de nombreux filets à cette artère.

On peut réunir ces différents nerfs, provenant de l'auriculo-temporal et de son plexus, sous le nom *de nerfs vasculaires auriculo-temporaux* pour les distinguer dans la suite.

J'ai décrit à propos des nerfs parotidiens les effets de l'excitation de l'auriculo-temporal et de ses branches sur les vaisseaux ; j'ai rappelé les expériences de Cl. Bernard sur ce point de la physiologie vasculaire. Il n'y a pas à revenir ici sur les détails mentionnés plus haut, mais je dois compléter en quelques mots l'histoire du nerf auriculo-temporal dans sa portion superficielle.

On a pensé que ce nerf agissait comme vaso-dilatateur, et

(1) Pour la constitution de ce plexus et les racines multiples du nerf auriculo-temporal, voir *Nerfs parotidiens*, p. 206 et seq.

(2) Arnold (*Icon. nerv. cap.*, tabulæ III, V, VI, VIII.
Meckel, vol. I, tab. II.
Bock (*Fuenftes*, t. I, tab. II).
(*Nachtrag*, t. IV).
Weber, Swan, cités par les *Aut. de l'Encyclop. anat. Névrol.*, t. IV).

Schiff (1) a vu que sa galvanisation s'accompagnait de dilatation vasculaire sur le lapin ; mais il fait remarquer que ce résultat n'est point constant.

Cl. Bernard (2) a constaté de même que sous l'influence de l'excitation du nerf auriculo-temporal, le sang coulait avec plus d'abondance par la veine auriculaire, et que les vaisseaux se dilataient davantage, sans toutefois présenter de pulsations évidentes. Le sympathique examiné à ce moment agissait toujours en sens contraire (3).

« Nous devons ajouter, dit encore Cl. Bernard, que le nerf auriculo-temporal était sensible à la galvanisation. »

Ce dernier détail introduit une grande difficulté dans l'interprétation des résultats précédents. La question se complique de l'action réflexe produite par l'excitation des nerfs sensibles (4) ; tantôt ce sont des contractions réflexes, tantôt au contraire, des dilatations vasculaires qu'on observe (5) dans des régions prochaines ou éloignées, à la suite de la galvanisation des nerfs de sensibilité : de là un désaccord complet entre les physiologistes, aussi bien à propos des expériences sur le sciatique que de celles qui ont porté sur le nerf auriculo-temporal.

Pour ce dernier, par exemple, je lis dans le récent ouvrage du professeur Vulpian (p. 153) « qu'il a toujours observé une constriction considérable des vaisseaux de l'oreille, chaque fois que l'auriculo-temporal ou que le rameau auriculaire du

(1) Schiff, *Archiv. f. Physiol. Heilkunde*, 1851, *et Untersuchungen über die Zuckerbildung in der Leber*. Wurtzbourg, 1859. (Dilatation vasculaire par l'excitation de certains rameaux vaso-moteurs.)

(2) Cl. Bernard (*Liq. de l'organ.*, t. II, p. 331).

(3) C'est sur des oppositions de ce genre qu'a été fondée la théorie de l'antagonisme entre les nerfs cérébro-spinaux et le sympathique. Cette opinion a été présentée avec détail par Virchow. (*Dessen Archiv.*, 1851, 1853. Erlangen, 1854.)

(4) Névralgies suivies d'hyperémie (zona, etc).
Weir Mittchell (*Lésions des nerfs*).
Charcot (*Leçons sur les maladies du syst. nerveux*).
John Simon (*Gen. Pathology*, London, 1850).
Romberg (*Klinik warn. u. Beobacht*, Berlin, 1851).
Snellen (*Arch. f. d. Holl. Beitrage*, von Donders, 1857.

(5) Vulpian (*Leçons vaso-mot.*, 1874).
Stilling (*Spinal irritation*, 1840 et 1851).

facial qui reçoit une anastomose de cette branche du trijumeau, était électrisé. »

Voilà donc des résultats opposés (et j'en abrége le récit), qui me laissent fort incertain sur le rôle de l'auriculo-temporal dans l'innervation vasculaire de l'oreille : la question me paraît devoir rester en suspens, jusqu'à ce que les conditions expérimentales dans lesquelles chacun s'est placé soient nettement déterminées.

L'oreille du lapin a joué un grand rôle en physiologie depuis les mémorables travaux de Cl. Bernard sur le sympathique cervical, et les quelques lignes qui précèdent ne résument qu'une bien faible partie des expériences dont elle a été l'objet.

Ne pouvant en donner l'exposé complet, je ne veux cependant point quitter ce sujet sans dire un mot d'une théorie qu'on a proposée pour la suractivité circulatoire consécutive à l'excitation de certains nerfs, et dont le point de départ est précisément dans des observations faites sur l'oreille du lapin, comme sur d'autres membranes où les vaisseaux sont bien visibles. C'est la théorie des contractions péristaltiques, à laquelle se rattachent surtout les noms du regretté Legros et de M. Onimus (1).

Le fait lui-même des contractions et des dilatations *périodiques* n'est pas douteux ; Schiff (2) les a vues se propageant des artères de la base de l'oreille aux ramuscules et aux veines ; mais ces alternatives de systole et de diastole se succèdent-elles avec la régularité et la fréquence indiquées par Schiff ? V. d. B. Callenfels a vu chaque état de contraction ou de dilatation durer une minute ou même davantage (3). C'est déjà une raison pour douter un peu de l'action efficace de ce cœur périphérique.

(1) Legros, en 1865, a émis, l'un des premiers, l'opinion que les contractions rythmiques, péristaltiques des vaisseaux activaient le cours du sang. Depuis, la même théorie a été développée par le même auteur (*Th. agrégation* 1873), et par M. Onimus (*Traité d'électricité médicale*, et cette année même (*Congestions actives*, Onimus). C'est dans ce dernier travail, destiné surtout à répondre aux objections du professeur Vulpian, que M. Onimus a présenté la théorie dont il s'agit avec le plus de détail.

(2) Schiff. *Ein accessorischen arterien* (*Archiv. f. Physiol.Heilkunde*, 1854).

(3) Van der Beke Callenfels (*Ueber den Einfluss der vaso-mot... In Zeitschrifft, Rev. Mediz.*, 1855, t. VIII).

Mais il y a une autre raison plus sérieuse encore : en admettant qu'une zone de l'artère, après s'être dilatée, revienne énergiquement sur elle-même, pourquoi poussera-t-elle le sang plutôt dans un sens que dans l'autre ? Où est la valvule qui s'opposera au reflux, ou, tout au moins, fournira un point d'appui à la colonne sanguine comprimée par la paroi ? En amont du point resserré c'est un point dilaté qui se présente, c'est-à-dire qu'au lieu d'un obstacle la colonne sanguine va trouver en arrière une voie ouverte : elle tendra par conséquent à revenir sur ses pas, aussi bien qu'à progresser.

Il est probable que Milne-Edwards (1) pensait ainsi, quand il écrivit : « Les changements de calibre dans cette partie me semblent au contraire devoir retarder plutôt qu'accélérer le cours du sang. »

Innervation vasculaire des régions frontales, temporo-pariétale et occipitale.

1. Les artères qui se distribuent aux régions frontale et temporale font suite à celles que nous avons étudiées soit à la face (régions palpébrale et sourcillière), soit à la région auriculaire superficielle.

Par conséquent, les nerfs qu'on y rencontre ont déjà été indiqués, et je crois devoir ne point les rappeler ici autrement qu'en résumant leur provenance générale.

Filets du sympathique libre fourni par le plexus de la carotide externe pour la temporale et ses branches, par celui de la carotide interne et le plexus caverneux pour les artères frontales, branches de l'ophthalmique.

Trijumeau (branche ophthalmique pour les frontales) ; branche maxillaire inférieure pour les branches de l'artère temporale.

Facial anastomosé avec trijumeau pour les unes et les autres.

Plexus cervical (par le grand nerf auriculaire) pour les auriculaires postérieures qui montent à la région temporo-pariétale.

(1) Milne-Edwards (*Anat. et Physiol. comparées*, t. IV, 218).

Ces différents vaisseaux sont donc soumis aux mêmes influences que ceux des régions superficielles de la face et du pavillon de l'oreille.

2. Quant à la région occipitale elle est parcourue par les branches des artères auriculaire postérieure et occipitale de la carotide, qui supportent, de leur origine à leur terminaison, les filets sympathiques empruntés au plexus du tronc d'origine.

Nous connaissons déjà les filets qui suivent les auriculaires postérieures; quant aux branches de l'occipitale elles sont innervées à la fois par le facial et par les 2e et 3e nerfs cervicaux. « La branche postérieure du facial au dessous du trou stylo-mastoïdien donne le nerf occipital profond qui s'anastomose avec le rameau occipital du 2e nerf cervical et la branche auriculaire postérieure du 3e : de ces anastomoses résultent des réseaux qui fournissent aux vaisseaux sanguins et probablement au diploé de l'os lui-même (1). »

Nerfs vasculaires de la cavité crânienne.

1. *Nerfs vasculaires des enveloppes de l'encéphale. Dure-mère.* — Des trois groupes de nerfs signalés pour la dure-mère, le groupe moyen seul paraît être en rapport avec des vaisseaux.

Le groupe antérieur en effet, très-restreint du reste, est formé par quelques filets du rameau ethmoïdal qui semblent ne faire que passer sur la dure-mère pour aboutir soit au trou borgne, soit aux sinus frontaux,

Le groupe postérieur, que constituent surtout des filets récurrents de l'ophthalmique, se perd dans l'épaisseur de la tente du cervelet.

A ce groupe on peut joindre des filets émanant du plexus caverneux, et formant, d'un côté à l'autre de la gouttière basilaire, un plexus anastomotique décrit surtout par Hirschfeld (2) comme moyen d'union entre le plexus caverneux de droite et celui de gauche. Ces filets, déjà indiqués par Warrentrapp

(1) *Encyclopédie anatomique*, t. IV.
(2) Hirschfeld (*Comptes rendus Acad. sc.*, 1845).

en 1831 et un peu plus tard par Valentin (1), sont mis en doute par le professeur Sappey.

Ni l'un ni l'autre de ces deux groupes n'est affecté à des vaisseaux.

Le groupe moyen au contraire, de provenance différente suivant les anatomistes, est tout entier en rapport avec l'artère méningée moyenne et ses divisions.

Nous avons vu, soit à propos des nerfs parotidiens, soit à propos de la région auriculaire, à combien de sources différentes le plexus temporo-maxillaire puisait ses éléments, et nous nous trouvons maintenant en présence de l'une des branches qui plongent au milieu même de ce plexus, la méningée moyenne : elle apporte donc avec elle dans la cavité crânienne, à la surface de la dure-mère, de la base à la convexité, les éléments multiples empruntés au plexus temporo-maxillaire. Ce sont ces nerfs que M. Sappey a suivis jusqu'à la partie moyenne du pariétal, qu'il a vus, à partir de cette région, se dépouiller de leur myéline et devenir d'une telle ténuité qu'il n'a pu les suivre jusqu'au sinus longitudinal.

L'innervation vasculaire de la dure-mère se borne à cette région, et du reste les vaisseaux de cette membrane sont très-peu nombreux.

La dure-mère présente donc au point de vue de la vascularisation et de l'innervation une disposition inverse de celle qui se rencontre dans le périoste auquel on l'a souvent assimilée. L'anatomie semble dès lors peu prêter au rapprochement, et la clinique, en nous montrant le mode de réparation des pertes de substance des os du crâne, n'est pas davantage favorable à la comparaison proposée entre la dure-mère et le périoste.

Pie-mère :

Etudier l'innervation des vaisseaux de la pie-mère c'est étudier celle des vaisseaux de l'encéphale, car les artères de cette membrane appartiennent en réalité à la substance nerveuse elle-même : elles sont appliquées immédiatement sur le tissu nerveux, et lui fournissent ses vaisseaux.

On peut diviser les nerfs vasculaires de la pie-mère et de

(1) Sappey (*Névrologie*, 1872).

l'encéphale en deux groupes : *le groupe carotidien et le groupe vertébral.*

Le premier, affecté surtout aux artères du cerveau proprement dit, et le second à celles de la protubérance, du bulbe et du cervelet, opèrent leur jonction sur le vaisseau même qui établit la continuité entre la circulation antérieure et la circulation postérieure, sur l'artère communicante postérieure (fig. 133).

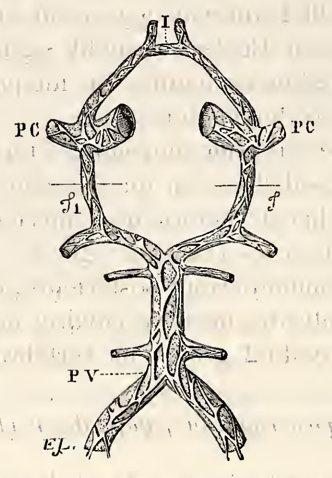


Fig. 134. — Schema des nerfs vasculaires de la base de l'encéphale. — PC, PC, plexus carotidien; PV, plexus vertébraux, opérant leur jonction : en J' sur l'artère communicante postérieure; en I, sur l'artère communicante antérieure, s'unissent les plexus carotidiens.

Groupe des nerfs vasculaires carotidiens.

Nous ne tarderons pas à étudier en détail les anastomoses des rameaux carotidiens du ganglion cervical supérieur avec les nerfs crâniens; mais je puis dire ici, que ces rameaux sympathiques reçoivent de la plupart des nerfs crâniens des anastomoses rendant nécessairement complexes les filets qui émanent du plexus. On peut en juger en jetant un coup d'œil sur la figure 135 où l'on voit les nerfs crâniens antérieurs et postérieurs envoyer de nombreux rameaux communicants aux plexus carotidiens, ainsi qu'au ganglion cervical supérieur. Les filets qui entourent la carotide interne à partir de ces anastomoses et passent sur les artères cérébrales, apportent donc à ces vaisseaux des influences provenant de sources multiples et dont je n'ai point la prétention d'analyser les manifes-

tations physiologiques ; je me bornerai à rappeler d'une manière générale que l'innervation vasculo-motrice dans le cerveau, comme ailleurs, n'agit sur la fonction qu'en modifiant, avec le calibre des vaisseaux, la quantité de sang qui arrive à l'organe. Cette question déjà soulevée à propos de l'innervation vasculaire des glandes, se retrouve au sujet de l'encéphale et me paraît comporter une solution semblable.

Les filets qui accompagnent l'artère cérébrale antérieure s'unissent aux filets du côté opposé sur la communicante antérieure. Ribes et Béclard avaient signalé à ce niveau un renflement ganglionnaire qui a été nié par Lobstein, et dont l'existense est restée douteuse (1).

Pour l'artère cérébrale moyenne, « un tractus principal de fibres nerveuses déliées, ou un faisceau un peu plus fort, se dirige le long du côté antérieur et inférieur de l'artère et distribue des filets à ses branches (2). »

Quant à la communicante postérieure, elle serait le lieu de jonction (J[1]) entre les nerfs vasculaires du 1[er] groupe ou carotidiens et ceux du 2[e] groupe ou vertébraux (3).

Groupe postérieur ou groupe des nerfs vertébraux.

Les artères vertébrales pénètrent dans le crâne, apportant aux régions postérieures des filets nerveux vasculaires qui ont été suivis très-haut sur le tronc basilaire, les cérébelleuses, la cérébrale postérieure (4).

Ces nerfs complètent l'innervation artérielle de l'encéphale en s'anastomosant avec ceux du 1[er] groupe, comme cela a été indiqué.

La circulation encéphalique se trouve ainsi subordonnée tout entière à deux groupes de nerfs, dont les uns sont plus

(1) Longet (*Anat. et Physiol. syst. nerv.*, 1842).
Sappey, *loco cit.*

(2) *Encyclop. anat.*, t. IV, p. 579.

(3) La choroïdienne antérieure n'est point signalée ici, faute de documents sur les nerfs du plexus caverneux qui peuvent l'accompagner.

(4) Blandin (*Nouveaux éléments d'anatomie descriptive*, t. II, p. 727).
Wrisberg (*De nervis arterias venasque comit. In Ludvig scriptores*, t. III) ne mentionne que les filets qui entourent l'artère basilaire.
Brown-Séquard. Kussmaul et Tenner. Schrœder van der Kolk (*Œuvres*), Axenfeld, *in Pathologie de Requin, Névroses*.)

spécialement en rapport avec les vaisseaux des régions antérieures du cerveau, et les autres avec ceux de ses lobes postérieurs, ainsi qu'avec le bulbe, la protubérance et le cervelet.

Il n'est peut-être pas hors de propos de rappeler ici que la circulation intra-crânienne est intimement liée aux circulations oculaire et auditive, et qu'une influence nerveuse, capable de modifier l'ensemble de ces circulations, en provoquant un spasme vasculaire subit et une anémie brusque, doit entraîner en même temps que le vertige, et une foule de troubles d'origine bulbaire, l'obnubilation des sens oculaire et auditif. Si l'on ajoute à cette communauté de l'innervation vasculaire dans l'encéphale, l'œil et l'oreille, les rapports qui unissent l'innervation des vaisseaux de la face à ceux des régions intra-crâniennes (V. S.), on comprend facilement que la pâ-

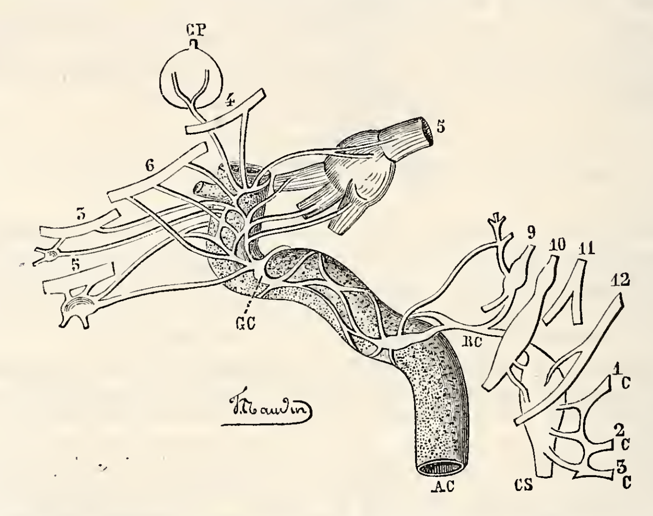


Fig. 135. Schéma indiquant les rapports : — 1° du ganglion cervical supérieur avec les trois premières paires cervicales (1c, 2c, 3c) et les nerfs crâniens (12), grand hypoglosse (10), pneumo-gastrique;—2° du rameau carotidien *Rc* avec le glosso-pharyngien (9); — 3° des plexus carotidiens et caverneux appliqués sur la carotide *Ac* avec les nerfs moteur oculaire commun (3); pathétique (4); trijumeau (5); moteur oculaire externe (6).
GP Corps pituitaire et branches de communication avec le plexus caverneux ?
GC Ganglion carotidien (?)

leur des téguments se produise au même titre que la pâleur profonde : la théorie générale du début de l'attaque d'épilepsie s'appuie sur ces données.

J'ai choisi cet exemple qui m'a paru propre à montrer l'influence des nerfs vasculaires de l'encéphale pris sur les vaisseaux eux-mêmes, abstraction faite de leur provenance.

Si maintenant nous voulons remonter au point de départ des deux groupes de nerfs vasculaires intra-crâniens, et étudier expérimentalement l'influence des plexus ou cordons qui leur donnent naissance, nous trouverons des renseignements assez précis, quoique en petit nombre, pour ce qui concerne le groupe des nerfs vasculaires carotidiens, et au contraire la pénurie la plus complète au sujet du groupe des nerfs vasculaires vertébraux.

En effet, nous savons que le ganglion cervical supérieur, auquel aboutit le cordon sympathique prévertébral, fournit le rameau carotidien, et reçoit lui-même des anastomoses des deux premières paires cervicales, du nerf vague, du glosso-pharyngien et de l'hypoglosse ; que, plus haut, les nerfs trijumeau, moteurs oculaires commun et externe, le pathétique, envoient des filets au plexus caverneux. (V. fig. 135.) Ce sont là des origines complexes, sans doute, pour les nerfs vasculaires du groupe antérieur; mais enfin nous les connaissons, et l'expérimentation (1) peut arriver à interpréter ses résultats ou tout au moins à en proposer une explication.

(1) *a*) Expériences sur vaisseaux de la pie-mère cérébrale.

Donders (*Nederland Lancet*, p. 521). Dilatation des vaisseaux de la pie-mère après section du cordon sympathique; resserrement par excitation.

Nothnagel (*Des nerfs vaso-moteurs des vaisseaux du cerveau. — Virchow's Archiv. Anal. in Gaz. hebd.*, 1867). Dilatation des vaisseaux de la pie-mère, surtout marquée quand le ganglion cervical supérieur a été arraché.

Cl. Bernard (cité par Vulpian, *Leçons de 1874*). Mêmes effets de vascularisation; élévation de la température.

E. Goujon (*Journal anatom.*, Robin, 1867, p. 107). Méningite céphalo-rachidienne, consécutive à la section des filets cervicaux sympathiques (Lapin, Cochon d'Inde). Contre-épreuve par ligature des carotides primitives avec filets du sympathique qui se distribuent aux vaisseaux du centre nerveux (Chiesco).

b) Expériences sur vaisseaux de la pie-mère médullaire.

L'intérêt qui s'attache à l'étude des influences nerveuses sur les vaisseaux des centres eux-mêmes m'avait engagé à chercher quelques documents relatifs à l'innervation vasculaire de la moelle : l'anatomie ne m'a fourni sur l'origine et le trajet de ces nerfs que des renseignements très-incomplets, et je n'ai recueilli en fait d'expériences que celles de Brown-Sequard et de Gull que je résume en quelques mots :

Brown-Sequard (*Paraplégies*, p. 101, et *Lectures on the Paralys.*, 1861) rapporte « qu'il a vu se produire sous ses yeux une contraction des vaisseaux

Nous sommes moins en mesure d'indiquer pour les filets du groupe postérieur un point de départ certain, et cependant il serait tout aussi important de connaître la source des nerfs qui desservent les vaisseaux du bulbe, de la protubérance, que la provenance des nerfs des vaisseaux cérébraux proprement dits.

La question me semble se poser ainsi : Le nerf vertébral (ou pour mieux dire le plexus vertébral (1) est-t-il l'analogue du *rameau carotidien du ganglion cervical supérieur,* et *provient-il réellement du ganglion cervical inférieur?*

L'anatomie descriptive de l'homme, en nous indiquant les branches que les nerfs cervicaux envoient au nerf vertébral (2), nous force déjà à considérer ce nerf comme complexe, comme plus important qu'une simple branche fournie par un ganglion pour accompagner une artère. Cette remarque nous reporte tout de suite à la constitution du plexus caroti-

sanguins de la moelle épinière (vaisseaux de la pie-mère), au moment où une ligature était appliquée sur le hile du rein et irritait les nerfs rénaux, ou lorsqu'une opération semblable était pratiquée sur les vaisseaux et nerfs des capsules surrénales. — En général, dans ces cas, la contraction était beaucoup plus évidente sur le côté de la moelle correspondant au côté des nerfs irrités. »

Gull (*Guy's Hosp. Rep.*) a répété avec Pavy et Durham les expériences de Brown-Sequard sur des chiens et des lapins. — Ces physiologistes n'ont pu arriver à reproduire les faits énoncés par Brown-Sequard, et insistent même sur ce point, qu'à l'ouverture du canal rachidien, on ne voit à l'œil nu que quelques petits veinules (veines dorsales et tributaires), mais rien d'apparent du côté de la pie-mère.

C'est cependant sur ces expériences qu'est fondée la théorie des paraplégies réflexes : mais l'ischémie reflexe, permanente de la moelle, admise par Brown-Sequard, n'a pas semblé à tous appuyée sur des données expérimentales suffisantes. — Le professeur Vulpian a du reste tracé le programme des recherches à tenter dans cette voie, en indiquant sur quels nerfs devaient porter les sections et électrisations. Vulpian (*Vaso-moteurs*, 1874, p. 190).

(1) Swan. Fœsebeck. Valentin. *Loco cit.*

(2) Rapports du nerf vertébral avec les nerfs cervicaux :

Premier nerf cervical. — « Sort non devant, mais derrière l'apophyse oblique de chaque côté, donne à l'artère vertébrale des filets qui l'accompagnent dans le crâne... »

Asch. — Monographie du premier nerf cervical (*nervus Aschianus*), de primo pare nervorum medullæ spinalis. *In Ludvig Scriptores neurol. min.*, vol. I, p. 311 à 325. — « La branche antérieure de ce tronc, avant d'aborder l'anse qu'elle forme avec le second nerf cervical, distribue de nouveaux filets à l'artère vertébrale. »

(*Encyclop. anat. névrol.*, p. 447).

Deuxième nerf cervical. — « Sa branche antérieure, parmi les filets qu'elle

dien dont nous avons vu tout à l'heure les nombreuses anastomoses avec les nerfs crâniens. C'est là un point de ressemblance, et jusqu'ici nous pouvons admettre que si le plexus carotidien apporte aux vaisseaux de la partie *cérébrale* de l'encéphale les influences réunies du sympathique et des nerfs crâniens, le plexus vertébral fournit aux vaisseaux de la *région postérieure*, en même temps que l'influence du sympathique, celle des nerfs cervicaux dont il reçoit des anastomoses.

En outre de ce premier point de ressemblance, on en pourrait admettre un second fourni par la présence de renflements ganglionnaires sur les diverses branches du plexus carotidien (1), comme sur celles du plexus vertébral (2).

Si nous ajoutons à ces raisons de rapprocher le plexus vertébral du plexus carotidien, la distribution de ces deux groupes de nerfs sur les vaisseaux de l'encéphale, nous sommes assez fondés pour considérer comme légitime le parallèle précédent,

fournit aux muscles oblique, scalène, en donne un à l'artère vertébrale avant d'aborder la première anse cervicale antérieure.

Troisième nerf cervical. — « Donne un filet à l'artère comme le précédent.

Quatrième nerf cervical. — « Au niveau du trou de conjugaison donne des filets à l'artère vertébrale.

Cinquième nerf cervical. — « Peu après s'être anastomosé avec les nerfs qui montent le long de l'artère vertébrale, se partage en ses deux branches.

Sixième nerf cervical. — « A sa sortie du trou de conjugaison, s'anastomose avec les nerfs vasculaires ascendants de l'artère vertébrale.

Septième nerf cervical. — « Tronc s'anastomose derrière l'artère vertébrale avec les nerfs vasculaires qui remontent le long de ce vaisseau. »

La branche antérieure, passant derrière le scalène antérieur, s'anastomose, par un rameau qui suit l'artère vertébrale, avec le dernier ganglion cervical et le premier ganglion thoracique.

Huitième nerf cervical. — Tronc s'anastomose parfois avec le ganglion cervical inférieur et le premier ganglion thoracique. — Branche antérieure communique, par une double anastomose, avec le premier ganglion thoracique derrière le scalène antérieur.

(1) F. Petit et Shmiedel signalèrent avant Laumonier (1793) et Lobstein, de petits renflements ganglionnaires sur le trajet du rameau carotidien (Longet, *Anat. et Physiol. du syst. nerveux*, 1842).

Mais les anatomistes qui font autorité aujourd'hui (Sappey, Hirschfeld, Cruveilhier, etc.) ne sont pas d'accord sur la véritable nature ganglionnaire de ces renflements; il vaut peut-être mieux, à l'exemple de Cruveilhier, dire « *renflement gangliforme*, » ce qui ne préjuge rien.

(2) L'existence de renflements véritablement ganglionnaires sur le trajet du nerf vertébral, si elle a pu rester douteuse chez l'homme, semble bien réelle sur certains animaux. (Voy. *Notes sur nerf vertébral considéré comme continuation du sympathique*, page 312.)

et pour admettre la première partie de la proposition : le *plexus vertébral est l'analogue du plexus carotidien.*

Mais, si cette assimilation réunit en sa faveur des arguments suffisants, il ne s'ensuit pas que nous devions voir dans le nerf vertébral *une simple branche émanant du ganglion cervical inférieur.*

Ce nouveau point, qui, dans une étude spéciale du nerf, devrait être présenté sur le même plan, m'a paru ici hors cadre vu la nature de mon sujet, et j'ai cru préférable d'indiquer en dehors du texte courant les notions que j'ai recueillies sur cette question (1).

(1) *Nerf ou plutôt plexus vertébral* (voy. *fig.* 136) *considéré comme cordon du sympathique.* — Cette interprétation repose en résumé sur les données suivantes :

I. — *Ganglions sur le trajet de ce plexus.* — Blainville a décrit (*Journal de Physique*, 1821, — réimp. dans *Annales d'anat. et de physiol.*, 1841) le nerf vertébral de l'éléphant comme une véritable chaîne ganglionnaire.

Chez les oiseaux, entre autres particularités, le même nerf est incontestablement ganglionnaire (Longet, *Anat. et Physiol. syst. nerv.*).

La même disposition ganglionnaire est admise chez l'homme (V. S.) par quelques anatomistes, mais reste douteuse pour beaucoup.

II. — *Suppléance du cordon sympathique prévertébral par le nerf vertébral.* On sait que le cordon cervical fait défaut chez les oiseaux à la région prévertébrale, et Cuvier, dans sa première édition, disait même que les oiseaux manquent de sympathique au cou. — Depuis, on a reconnu son existence dans le canal de l'artère vertébrale, et F. Cuvier et Laurillard (édition de 1845), l'ont admis ainsi. Le fait n'est aujourd'hui douteux pour personne (Müller, *Phys.*, t. II, p. 730; — Longet, — Encycl. anatom., et auteurs d'anatomie comparée).

III. — *Rapport entre le développement du nerf vertébral et de l'artère correspondante.*

Chez les oiseaux précisément, les artères vertébrales (qui souvent proviennent des carotides primitives), diminuent peu à peu de calibre à mesure qu'en montant dans le canal vertébral elles fournissent des ramuscules aux parties voisines. Arrivées sous la base du crâne, elles sont considérablement réduites, et s'y terminent en grande partie dans l'occipitale, sauf un faible rameau qui suit la marche ordinaire pour se terminer à la moelle allongée... Ce sont les cérébrales, branches des carotides, qui donnent les spinales antérieures et postérieures. » (Cuvier, *Anatomie générale.*)

On fait alors ce raisonnement, que, si le nerf vertébral était réellement et uniquement destiné à l'artère vertébrale et à ses branches, on ne le verrait pas à son développement maximum chez les animaux mêmes où l'artère vertébrale est rudimentaire; d'un autre côté, ce nerf remplace évidemment le cordon prévertébral chez les oiseaux; par conséquent l'analogie porte à conclure, qu'à des degrés divers, il joue le rôle de cordon sympathique dans la série animale.

Je crois que cette conclusion doit, pour avoir une véritable valeur, s'appuyer sur des comparaisons plus nombreuses entre le développement comparé du nerf vertébral et de l'artère correspondante. A ce titre, le nerf en question pourrait être avantageusement étudié chez les animaux suivants :

J'ai essayé de réunir dans une figure schématique les points principaux relatifs à la provenance des nerfs vasculaires du district carotidien, comparée à celle des nerfs vasculaires du district vertébral. On voit (fig. 136) que le plexus nerveux vertébral émane du premier ganglion thoracique, du ganglion cervical inférieur, et successivement (1,2,3,4,etc.), des huit nerfs cervicaux (1). On voit d'autre part que le plexus nerveux carotidien est également en rapport par le cordon cervical avec le ganglion cervical inférieur et les huit nerfs cervicaux, 1, 2, 3, 4, etc., mais que, de plus que

— Les ruminants ont, comme les oiseaux, une vertébrale qui semble se consumer entièrement, soit pour fournir des rameaux à la moelle épinière et à ses enveloppes, soit pour les muscles de la nuque, et cette artère ne paraît pas contribuer à la formation de la basilaire (Cuvier, *Anatomie comp.*, t. VI).

On la trouve proportionnellement petite chez le blaireau, et s'anastomosant par une branche assez considérable avec l'occipitale. (Planche inédite de Cuvier, citée par Duvernoy. — Edition de Cuvier.)

— Les hérissons (et les animaux hibernants en général) ont une artère vertébrale plus considérable que la carotide interne, au point qu'on a cru que ces animaux manquaient de cette dernière. L'artère basilaire, dans ce cas, forme en très-grande partie, ou même en totalité, le cercle de Willis, et fournit les artères postérieures comme les artères antérieures du cerveau.

(Orto. — Mémoire sur les vaisseaux céphaliques de quelques mammifères qui s'endorment pendant l'hiver. (*Ann. sc. nat.*, t. II, p. 200).

— Chez le cochon d'Inde et l'agouti, la vertébrale forme principalement le cercle de Willis, car la carotide interne n'est représentée que par un petit rameau de la carotide externe qui pénètre dans le crâne par le trou ovale. (Cuvier *Anat. comp.*, t. VI, p. 138.)

— Chez l'écureuil, la carotide interne, très-divisée, très-contournée, ne fournit que peu de sang au cerveau.

— Chez le loir et la marmotte, la distribution de la carotide interne ressemble beaucoup à celle de l'écureuil.

(Voir, sur ces points d'anatomie comparée, Rapp, *Mém. sur le réseau admirable* — *Arch. anat. et Physiol.*, Meckel, 1827. — Barlow, *Disquisitiones*.

IV. — *Anastomoses avec tous les nerfs de la région cervicale.* (Voy. plus haut *Note*, *Rapports du nerf vertébral avec les nerfs cervicaux.*)

C'est surtout cette dernière disposition qui a fait admettre par Wrisberg (*De nervis* et *In Ludwig Scriptores neurol. min.*, t. III), — Longet (*Anat. et Physiol. syst. nerv.*, t. II, p. 524), — Valentin (*Encycl. anat.*), et beaucoup d'autres anatomistes, que le nerf vertébral constituait un moyen d'union entre les paires cervicales et le ganglion cervical inférieur.

Quels que soient les résultats fournis sur ce sujet par les recherches dont il peut être l'objet, le rôle de *plexus vasculaire* n'en reste pas moins établi. C'est surtout ce point que je devais mettre à profit, mais j'ai cru devoir compléter la question en consignant en note les détails qui précèdent.

(1) Voir notes précédentes (*Rapports du nerf vertébral avec les nerfs cervicaux, et nerf vertébral considéré comme cordon sympathique.*)

le plexus vertébral, il est anastomosé avec les nerfs crâniens (groupes 1 et 2).

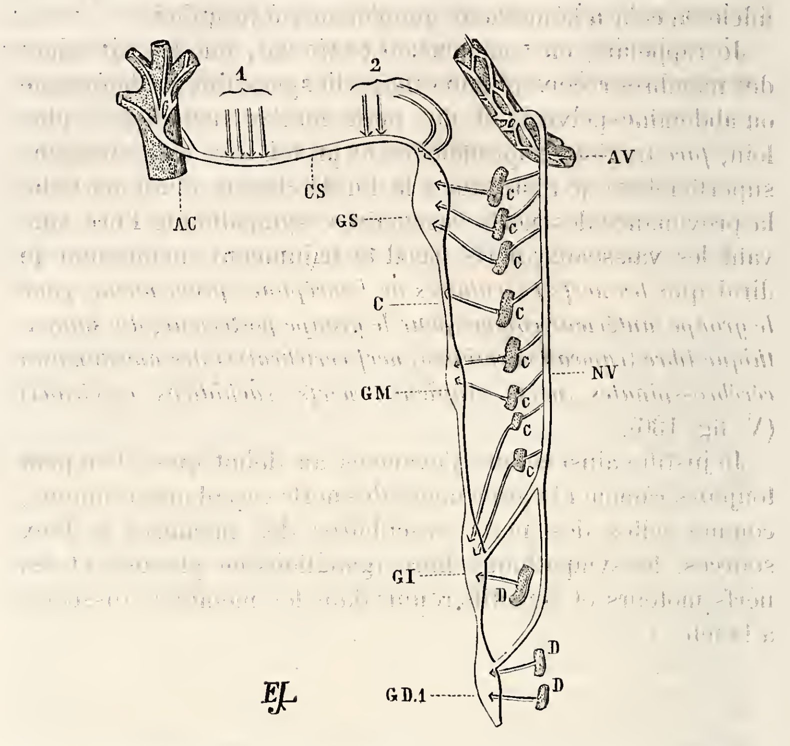


Fig. 136. — Schéma des rapports du nerf vertébral NV et du cordon cervical du sympathique CS. (—GS, ganglion cervical supérieur, — GM, ganglion cerv. moyen, — GI, gangl. cerv. inférieur,—GD. 1, 1er ganglion thoracique), avec les trois premières paires dorsales D, avec les huit nerfs cervicaux C. — Le cordon cervical communique de plus avec les deux groupes de nerfs crâniens 1, 2. — AV, artère vertébrale. — AC, carotide.

Resterait à déterminer : 1° la part prise par ces anastomoses si nombreuses à la constitution des nerfs vasculaires crâniens que j'ai divisés en *groupe carotidien* et *groupe vertébral ;* 2° le sens dans lequel cheminent les éléments nerveux crâniens au sein du plexus carotidien, et celui des filets cervicaux dans l'un et l'autre plexus.

Cette détermination serait assurément prématurée. Elle suppose en effet, bien connus au préalable, les rapports du sympathique avec les nerfs crâniens, et j'essayerai dans la 3e partie d'indiquer l'état actuel de nos connaissances sur ce sujet.

Pour terminer ce chapitre, je rapprocherai l'innervation vasculo-motrice de l'encéphale de celle des autres régions, fidèle en cela à la méthode que j'ai suivie jusqu'ici.

Je rappelais, en commençant ce travail, que les vaisseaux des membres reçoivent leurs nerfs du sympathique thoracique ou abdomino-pelvien, et des nerfs mixtes rachidiens ; plus loin, *face* (régions superficielles et profondes), *crâne* (régions superficielles), je résumais à la fin de chaque étude partielle la provenance des nerfs vasculaires (sympathique libre suivant les vaisseaux, nerfs facial et trijumeau) ; maintenant je dirai que *les nerfs vasculaires de l'encéphale proviennent, pour le groupe antérieur comme pour le groupe postérieur, du sympathique libre* (*rameau carotidien, nerf vertébral*) *et des anastomoses cérébro-spinales* (*nerfs crâniens, nerfs rachidiens cervicaux*) (V. fig. 136).

Je justifie ainsi ce que j'avançais au début que « l'on peut toujours ramener la provenance des nerfs vasculaires crâniens, comme celles des nerfs vasculaires des membres à deux sources, le sympathique libre (ganglions ou plexus), et les nerfs moteurs et sensitifs réunis dans les membres, dissociés à la tête. »

TROISIÈME PARTIE.

Documents pour servir à l'étude du sympathique crânien.

Les rapports si compliqués du sympathique avec les nerfs crâniens nécessitent une méthode rigoureuse dans les recherches qu'on entreprend sur ce sujet. La méthode la plus naturelle, et celle qui parait susceptible de fournir les meilleurs résultats, est actuellement employée soit par les auteurs d'anatomie descriptive humaine (Sappey), soit par les auteurs d'anatomie comparée (Gegenbaüer). Elle consiste à rapprocher les nerfs crâniens des nerfs rachidiens en se fondant sur la division vertébrale du crâne ; cette assimilation étant admise, la connaissance, aujourd'hui assez nette, des rapports du sympathique avec les nerfs mixtes rachidiens, autorise à rechercher dans les filets multiples qui relient les nerfs crâniens au sympathique, les analogues des rameaux communicants rachidiens.

Dans cette étude on ne saurait s'entourer de renseignements trop nombreux, et l'anatomie comparée, l'embryologie, la physiologie expérimentale, quelquefois la pathologie elle-même, doivent être tour à tour minutieusement interrogées. J'ai cherché à réunir, pour compléter le travail précédent, les principaux faits sur lesquels se fonde aujourd'hui l'histoire des rapports du sympathique avec les nerfs crâniens. J'en donnerai ici le résumé en procédant dans l'ordre suivant :

I. — DIVISION VERTÉBRALE DU CRANE.

La division du crâne en vertèbres fut au début de ce siècle présentée au monde scientifique avec un véritable enthousiasme par Oken, et acceptée sans hésitation par des savants de premier ordre. Oken appliquait à la tête sa conception générale de la formation vertébrale des divers segments du corps, et, saisissant dans son ensemble la valeur de la théorie sans en posséder encore les détails, il écrivait : « Le squelette n'est qu'un os vertébral, développé, ramifié, et l'os vertébral est le germe préformé du squelette ; l'homme entier n'est qu'une vertèbre (1). »

Quand ensuite la question fut mise à l'étude, beaucoup d'arguments favorables à la segmentation vertébrale du crâne (2) résultèrent des travaux entrepris pour l'appuyer;

(1) Oken (*Uber die Bedentrung der Schadelknochen*, Iéna, 1807).

A l'époque où son premier travail fut publié, Oken ne pouvait connaître les idées de Goethe qui ne virent le jour qu'en 1820. — Ce dernier cependant recueillait depuis longtemps des matériaux d'étude. et il avait déjà, avant 1791, compris le crâne comme formé d'os vertébraux, car, à cette époque, le hasard lui ayant fait rencontrer, dans un cimetière de Venise, une tête de mouton brisée, il étendit à la face la théorie de la dérivation vertébrale. « Là, dit-il, j'avais le fait tout entier dans sa généralité. » (*Zur Morphologie*, II.) — (Citation empruntée à Gegenbaüer.)

J.-P. Franck avait, du reste, émis en 1792 l'opinion que le crâne était formé d'une seule vertèbre. Mais ces recherches antérieures ne paraissent point de nature à enlever à Oken le mérite d'avoir le premier insisté sur l'importance de la théorie.

(2) Duméril (*Magasin Encyclopédique*, 1808) reprend les idées de J.-P. Franck.

Blainville (*Bulletin soc. Philomatique*, 1810. *Ostéographie*).

Spix (*Cephalogenesis*, 1815).

Carus (Leipsick, 1818, (cherche à étendre la théorie aux articulés V. I.) et *Traité d'anatomie comparée*, 1835.

Bojanus. Isis, 1819 d'après Gegenbaüer; 1811, d'après Milne-Edwards.

Geoffroy-Saint-Hilaire (*Annales sc. nat.*, 1824).

Ulrich. — Meckel.

Reichert (*Müller's Arch.*, 1827). Développement du crâne d'après un type analogue à celui de la colonne vertébrale.

Owen (*Britich association*, 1846, et *Ostéologie comparée*, 1864) remanie la théorie de l'homologie.

Lavocat (*Tératologie*, 1864).

Liégeois (*Physiologie*, 1869) cite vices de conformation du crâne, analogues au spina bifida (Monstres exencéphaliens, de Geoffroy-Saint-Hilaire, = *Nodencéphalie*, *proencéphalie*, *podencéphalie*).

mais, comme on devait s'y attendre, les recherches actives dont elle fut l'objet mirent au jour des objections (1) qui cependant ne semblent pas de nature à infirmer la théorie de la segmentation.

J'adopterai donc, à l'exemple de nos auteurs classiques, la division du crâne en trois vertèbres (postérieure ou occipitale, moyenne ou sphéno-pariétale, antérieure ou frontale).

C'est sur la description de Cruveilhier et sur la délimitation indiquée par lui que j'ai figuré la segmentation en trois vertèbres, indiquée dans la figure 137, dans laquelle j'ai supposé les vertèbres crâniennes disjointes pour mieux établir, avec leur limite, la situation des trous de conjugaison.

Sans entrer dans le détail de l'analogie entre telle ou telle partie de la vertèbre crânienne, avec telle ou telle région de

(1) Rathke, Agassiz, Vogt, Virchow, Huxley (*Proced. roy. soc.*, 1858, et *Elements of comp. anat.*, 1864).

Parmi ces objections, il en est une qui est assurément de nature à inspirer des doutes, et que Huxley a fort habilement développée : la segmentation vertébrale n'existe pas sur le crâne à son état de développement le moins avancé : ce n'est qu'à l'époque de l'apparition des pièces osseuses qu'on commence à trouver des traces de divisions.

La continuité du crâne primitif des vertébrés supérieurs peut cependant résulter elle-même d'une réunion préalable, d'une fusion acquise par des types intermédiaires que nous ne connaissons pas tous, et que le degré de perfection des animaux supérieurs actuels nous autorise amplement à supposer. En effet, cette concentration que l'on note dans les vertèbres supérieures existant actuellement ne se rencontre pas encore chez l'*amphioxus*, le seul vestige qui nous reste des organismes vertébrés de transition. — « La contraction de quelques métamères ou même d'un nombre assez considérable d'entre eux n'est point un fait isolé, et l'admission d'un fait de cette nature pour la partie antérieure du squelette axial des vertébrés n'est en aucune manière sans précédent : tête des insectes, céphalothorax des araignées et des crustacés. » Gegenbaüer, *Anatom. comparée*, p. 596.

C'est surtout l'assimilation des deux segments antérieurs du crâne (fronto-ethmoïdal et sphéno-temporal) qui a soulevé, de la part des embryologistes, les plus vives objections (Rathke, Agassiz, Vogt), pour cette raison que la corde dorsale, base du système vertébral, ne se prolongeait pas sous la base du crâne au delà du segment occipital. Mais Milne-Edwards (*Anat. et Physiol. comp.*, t. X) fait remarquer que cet argument n'est pas décisif, car « la gaîne notocordienne plutôt que la corde dorsale elle-même joue le rôle important dans le travail organogénique dont résulte une vertèbre, et le blastème qui donne naissance à toute la région moyenne et antérieure de la boîte crânienne est évidemment en continuité de substance avec celui où se forme cette gaîne. — Donc l'absence de la corde dorsale n'est pas incompatible avec l'homotypie entre ces anneaux et les anneaux vertébraux. — Voir pour détails sur le développement de la notocorbe, Ch. Robin, *Comptes rendus Acad. sc.*, mai 1867.

la vertèbre rachidienne, je me contenterai de rappeler que le corps étant représenté par la partie moyenne, le trou de conjugaison doit se rencontrer sur le côté de ce corps : il sera formé entre la vertèbre postérieure et la vertèbre moyenne par

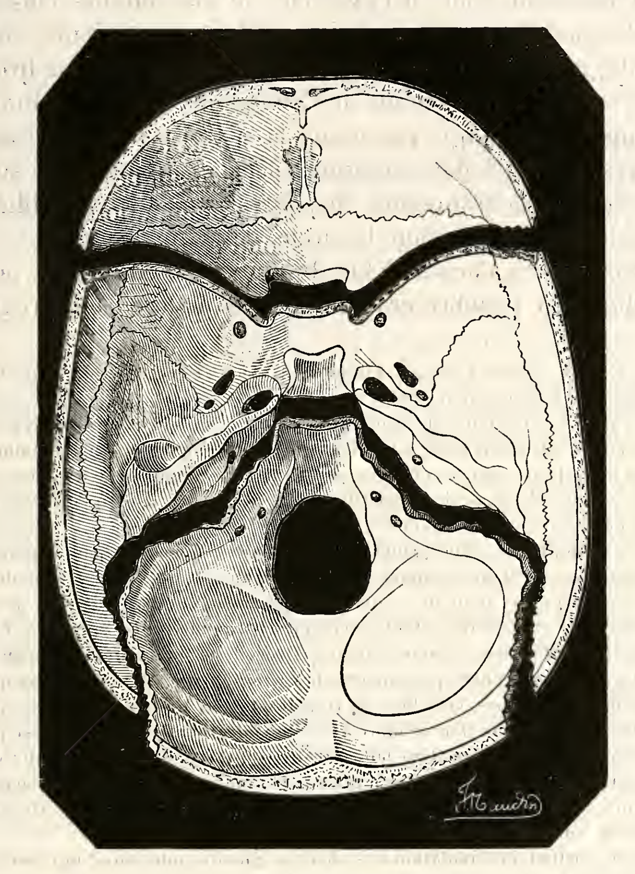


Fig. 137. — Segmentation vertébrale du crâne.

le trou déchiré postérieur, entre la vertèbre moyenne et la vertèbre antérieure par la fente sphénoidale et les annexes, trou grand rond et trou ovale (1).

(1) Le trou grand rond et le trou ovale sont annexes de la fente sphénoïdale, véritable trou de conjugaison antérieur, parce que, comme nous le verrons bientôt, ils servent au passage d'éléments dissociés d'une même paire crânienne.

L'anatomie comparée nous démontre du reste que cette émergence des élé-

Jusqu'ici par conséquent, au point de vue uniquement ostéologique, *nous trouvons deux trous de conjugaison crâniens, l'antérieur et le postérieur, ce qui implique l'existence de deux paires crâniennes, l'une antérieure, l'autre postérieure.*

II. — DIVISION VERTÉBRALE DES NERFS CRANIENS.

Dans cette étude, on met toujours à part les nerfs sensoriels supérieurs, l'olfactif, l'optique et l'acoustique, et l'une des bonnes raisons invoquées pour cette élimination est tirée de ce fait que chacun d'eux correspond à une pièce vertébrale intercalaire: l'une de ces pièces, l'auditive (Rocher), est démontrée par l'anatomie comparée et l'embryologie (1), la seconde, la pièce olfactive (Ethmoïde) et la troisième (formée par une portion de l'orbite) ont l'analogie en leur faveur (2).

On pourrait aussi s'appuyer sur le fait du développement isolé de l'appareil nerveux olfactif (bulbe du cerveau antérieur), de l'appareil oculaire (vésicule cérébrale antérieure), de l'appareil auditif (vésicule auditive résultant d'une invagination qui se fait des deux côtés de la tête, à la hauteur du cervelet, pendant la première période embryonnaire).

Quand il n'y aurait enfin que la spécialité même de leur fonction, les trois nerfs olfactif, optique, auditif, doivent être considérés comme surajoutés.

Il reste donc neuf nerfs crâniens à répartir en deux groupes correspondant chacun à un trou de conjugaison : en prenant pour nerfs primitifs, fondamentaux, ceux qui se distinguent dans la série animale par leur permanence et leur développement, nous admettrons, comme les auteurs déjà cités, le *groupe trijumeau* et le *groupe vague ou pneumogastrique.* Mais cette distinction du *Trijumeau* parmi les nerfs de la série antérieure, du *Vague* parmi ceux de la série postérieure, est

ments d'une même paire par des points isolés n'est pas chose rare à la région rachidienne. Chez les Sélaciens, par exemple, les racines rachidiennes quittent séparément le canal rachidien. De même, chez quelques grands mammifères (ruminants, solipèdes), on observe le passage des nerfs spinaux par les arcs de quelques vertèbres. — Notes empruntées à *Gegenbauer* (*loc. cit.*).

(1) *Encyclopédie anat.*, t. IV, p. 46.

(2) *Ibid.* *Ibid.*

trop importante pour être ainsi simplement formulée : elle mérite une sérieuse attention.

Convaincu que l'anatomie comparée pouvait légitimer cette division, j'ai rassemblé un certain nombre de matériaux, tous probants au point de vue de la fusion des nerfs crâniens en deux groupes, et de la dépendance dans laquelle ils sont les uns et les autres par rapport au trijumeau et au pneumogastrique.

Ce sont ces éléments de comparaison que je reproduis dans le chapitre suivant, avant d'étudier les rapports du sympathique avec les nerfs crâniens.

Réduction des nerfs crâniens à deux groupes représentant chacun une paire rachidienne.

Dans la série animale, on trouve de nombreux exemples permettant de ramener : 1° au trijumeau les nerfs moteurs oculaires commun et externe, le pathétique, une partie du facial : *de là le groupe trijumeau ;* 2° au pneumogastrique, une partie du facial, le glosso-pharyngien, le spinal et peut-être l'hypoglosse : *de là le groupe pneumogastrique.*

Chacun de ces deux groupes conserve sa valeur chez les vertébrés supérieurs, où ses éléments constitutifs se présentent plus ou moins dissociés. C'est là une déduction forcée, dont le caractère légitime ne peut être mis en doute.

1° *Groupe trijumeau.*

Facial considéré comme faisant partie du groupe trijumeau.— L'association de ces deux nerfs est un fait établi : l'anatomie nous les montre tous deux se partageant l'innervation des régions superficielles de la face, d'une grande partie de ses régions profondes, dans les muscles, la peau, les muqueuses, dans l'épaisseur des parois vasculaires (V. détails, *Nerfs vasculaires*, 2e partie). L'analyse physiologique, entre les mains de Cl. Bernard, a montré leurs rapports par la sensibilité ré-

currente ; nous connaissons les actes réflexes que provoque dans la sphère d'innervation du facial l'excitation des rameaux périphériques du trijumeau ; l'histologie enfin a permis de déterminer en partie les rapports intra-bulbaires de leurs racines.

L'anatomie comparée à son tour va nous fournir des preuves qui, pour être complémentaires, n'en ont pas moins une véritable valeur.

Chez les *Oiseaux*, l'affinité du facial avec le trijumeau ressort d'une manière évidente (1).

Chez les *Reptilès* (ophidiens, par exemple), le facial nait isolément, mais se plonge ensuite dans le ganglion de Gasser (coluber sicculus (2), crotalus horridus (3)).

Chez les *Batraciens*, le facial ne constitue qu'une branche du trijumeau (fig. 138).

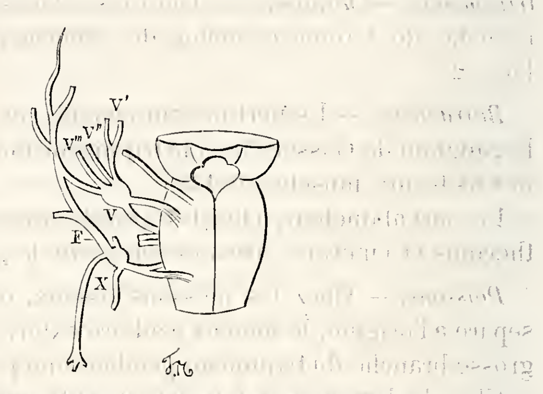


Fig. 138. — Bulbe fournissant le trijumeau V, V', V'', V''', et le pneumogastrique X. — On voit le facial F naître du pneumogastrique X et d'une branche V''' du trijumeau. — (Rana pipiens, d'après Wymann, Smithsonian Instit., V).

Chez les *Poissons* osseux, même disposition se retrouve (4).

Prenons maintenant quelques branches, les nerfs palatins moteurs et la corde du tympan.

(1) Alb. Meckel. *In Meckel's Archiv.*, t. II.

(2) *Encyclopédie Anatomiq.*, t. IV.

(3) Karl Vogt. Cité par Valentin.

(4) Gegenbaüer. *Anatomie comp.*, 1874, et *Travaux de Stieda* (V. infra. Müller. *Physiol.*, t. I, p. 730.

Büchner. *Mémoires Soc. d'hist. nat. de Strasbourg*, t. II (Adjonction du facial au trijumeau et au vague).

Nous savons que chez l'homme le grand et le petit nerfs pétreux superficiels sont fournis par le facial. Chez les amphibiens et les poissons, ils se retrouvent comme une dépendance du trijumeau, tout en ayant des rapports avec la branche représentant le facial.

La corde du tympan, si bien associée chez l'homme et les mammifères au lingual du maxillaire inférieur, se retrouve en connexion avec le maxillaire inférieur chez les téléostiens, chez les anoures et les urodèles (1).

De ces dernières indications surtout, découle l'association marquée du facial avec les deux branches inférieures du trijumeau, auxquelles il serait plus spécialement affecté comme élément moteur, tandis que les moteurs oculaires appartiendraient plutôt à l'ophthalmique.

Moteurs oculaires considérés comme faisant partie du groupe trijumeau. — *Mammifères.* Chez les cétacés déjà, la première branche du trijumeau donne des rameaux aux muscles de l'œil (2).

Batraciens. — Le nerf moteur oculaire externe passe dans le ganglion de Gasser (3), et le trijumeau donne par conséquent des filets aux muscles de l'œil.

Le nerf abducteur, chez les grands crapauds (4) (bufo pantherinus et cinereus), traverse en partie le ganglion.

Poissons. — Chez les poissons osseux, où il est distinct et séparé à l'origine, le moteur oculaire externe s'applique à une grosse branche du trijumeau pendant une partie de son trajet.

Chez la lamproie il fait défaut, et le muscle droit externe reçoit ses nerfs du trijumeau (5).

Le pathétique dont l'origine n'est pas distincte chez les cyclostomes à palais perforé, se confond chez la lamproie en un seul tronc avec le moteur oculaire commun (6).

Pour en terminer avec ce groupe, j'ajouterai, qu'au plus haut degré de réduction, chez les myxinoïdes, par exemple,

(1) Gegenbaüer. *Loc. cit.*
(2) Müller. *Physiol.*, t. I, p. 730.
(3) Volkmann. (*Muller's Archiv.*, 1838.)
(4) Vogt. (*Beiträge z. Neurol. d. Amphib.*)
(5) Schlemm et d'Alton. (*Archiv. anat.-physiol. et atlas.*, 1838.)
(6) *Encyclop. anat.*, t. IV, p. 47.

le trijumeau et le pneumogastrique représentent à eux seuls l'ensemble des nerfs crâniens.

Cette série d'exemples prouve déjà que le trijumeau mérite bien, de par l'anatomie comparée, d'être présenté comme un nerf primitif pouvant absorber les moteurs oculaires et une portion du facial, et *que l'assimilation de ce groupe à une paire rachidienne est tout à fait légitime.*

2° *Groupe pneumogastrique.*

Spinal considéré comme faisant partie du groupe pneumogastrique.

Il en est du spinal par rapport au pneumogastrique, comme du facial par rapport au trijumeau. — L'association de ces deux nerfs est évidente au point de vue anatomique, et les expériences de Bischoff, Cl. Bernard, Waller, etc., en désaccord pour ce qui concerne la distribution de chacun de ces éléments, sont du moins concordantes au sujet de la fusion des deux nerfs dans la première portion de leur trajet (1).

(1) Association du vague et de l'accessoire.

— *Pneumogastrique* (sensitif.)

Gœrres. Travaux de 1805. (*In Bischoff*, V, I.)

Arnold. Scarpa.

Bischoff. (*Anat. et phys. du n. accessoire. Heidelberg*, 1832.)

Longet. Mémoire de 1841. (*Action sur le larynx. Traité de physiol.*, 2e et 3e éditions.)

Valentin. (*De funct. nerv.* Berne, 1839. — *Névrologie.* Trad. Jourdan, 1843.)

— *Pneumogastrique* (*mixte.*)

Volkmann. (*R. Wagner's Haudworterb. d. phys.*, 1845, t. II.)

Stilling. (*Bericht von d. Versammlung der Naturforsch. in Braunschweig.*)

Van Kempen. Th. Louvain, 1842, et *Journ. physiol. Hom. et animaux*, 1863.

Cl. Bernard. (*Mem. Acad. sc. sav. étr.*, 1863. — *Système nerveux*, t. II. — *Œuvres, pass.*)

R. Wagner. Extr. Institut., n° 1022. (*In ann. sc. nat.*, 1853.)

— *Spinal.* (*Anatomie.*)

Willis. 1664.

Scarpa. 1788.

Sœmmering. Arnold. Bischoff. Valentin. (*Loc. cit.*)

— *Spinal.* (*Physiologie.*)

(*V.* Pneumog.)

A. Waller. 1856. (*V. Bull. acad. r. Belgiq.*, t. VI, et *Arch. physiol.*, 1872.)

L'anatomie comparée est très-explicite au sujet de cette fusion.

La description des rapports de ces deux nerfs chez l'homme est applicable (Cuvier) aux mammifères (magot, chien, raton, tigre, porc-épic, cochon, mouton, veau, etc.).

Tout en conservant son origine à part, le spinal entre aussi dans la sphère du pneumogastrique chez les oiseaux et les sauriens, ou bien il perd son origine distincte comme chez la grenouille, beaucoup de poissons osseux et les cyclostomes. (Bischoff.)

Glosso-pharyngien considéré comme faisant partie du groupe pneumogastrique.

Chez les poissons, le glosso-pharyngien marche principalement avec ou dans le pneumogastrique. (Dans le *strix scops* il est tout entier contenu dans le pneumogastrique.) (Bischoff.)

Chez les amphibiens, il forme le rameau le plus antérieur issu du ganglion du nerf vague, et ne paraît isolé qu'à son point de sortie de la moëlle allongée. (Vogt.)

Chez les oiseaux, une connexion semblable s'observe, la séparation est plus marquée à la sortie de la moelle ou de la cavité crânienne que sur le reste du trajet.

Chez les poissons (sélaciens, ganoïdes et téléostiens), le glosso-pharyngien ne prend que peu à peu la signification d'un nerf indépendant. (Gegenbaüer.)

Facial considéré comme faisant partie du groupe pneumogastrique.

L'anastomose jugulaire chez l'homme indique déjà ce rapport; mais aucun fait n'est plus explicatif à cet égard que l'anatomie des batraciens d'abord (V. fig. 138), nous montrant le facial partagé entre le trijumeau et le pneumogastrique, ensuite, que la conversion partielle du facial en nerf operculaire observée chez les poissons.

Hypoglosse considéré comme faisant partie du groupe pneumogastrique.

Il n'y a peut-être pas lieu de compter le grand hypoglosse au nombre des nerfs du groupe pneumogastrique, mais ce ne serait point à coup sûr pour en faire un nerf crânien primitif. La raison en est que chez certains animaux (grenouille et crapaud) il sort par le premier trou de conjugaison rachidien ; et comme chez certains mammifères (1) il présente une double origine médullaire, on pourrait le considérer comme le premier nerf rachidien. Cependant, son adjonction au groupe pneumogastrique peut être également défendue, en admettant que le trou condylien antérieur de l'occipital soit annexé au trou déchiré postérieur, de même que les trous grand rond et ovale sont annexés à la fente sphénoïdale.

Ici, comme à propos du groupe trijumeau, je dirai que les détails précédents justifient la constitution d'un groupe. Ce groupe a pour nerf primitif le pneumogastrique, et, pour annexes, une portion du facial, le glosso-pharyngien, l'accessoire et peut-être l'hypoglosse.

En résumé, les trous de conjugaison antérieur et postérieur du crâne laissent passer chacun une paire crânienne qui représente une paire rachidienne (2).

(1) Mayer. 1834. (*Chez le bœuf.*)

(2) Bibliographie pour anatomie comparée des nerfs crâniens. V. Gegenbaüer, (*Anat. comp.*, p. 706.)

J'y ajoute les notes suivantes que je dois à l'obligeance du professeur Balbiani :

Sur l'encéphale des poissons : Travaux de Stieda.

1° Studien über das centrale Nervensyst. den Knochenfische. (Von L. Stieda, *Zeitschrifft für Wissensch. Zool. von Siebold u. Kölliker*, t. XVIII, 1868. Pl. I.)

2° Ueber den Bau des Rückenmarks den Rochen und Haë. (von Stieda. (*Ibid.*, t. 23, 1873, p. 435.)

3° Ueber die Dentug der einz Theile des Firchgehirns. (von Stieda. (*Ibid.*, t. XXIII, p. 443.)

Sur le système nerveux central des vertébrés. (Mammif.-Batr.) Stieda. (*Zeit schrift von Siebold und Kölliker*, t. XX, 1870, p. 273 à 450.

III. — RAPPROCHEMENT ENTRE LE SYMPATHIQUE CRANIEN ET LE SYMPATHIQUE RACHIDIEN.

En donnant comme titre à la troisième partie de mon travail « documents pour servir à l'étude du sympathique crânien, » j'indiquais l'esprit dans lequel je l'abordais. La plus extrême réserve me semble en effet de rigueur dans les tentatives de ce genre, car je ne crois pas qu'on doive encore présenter de déterminations précises à l'égard du sympathique dans ses rapports avec les nerfs crâniens. Nous avons sans doute d'excellentes raisons pour assimiler les nerfs crâniens aux nerfs rachidiens, pour rapprocher par suite les filets vasculaires que contiennent ces deux ordres de nerfs; mais que de recherches sont encore nécessaires pour affirmer l'identité des points de ressemblance!

Mon but, dans ce dernier chapitre, est donc aussi restreint que dans le précédent : ce sont des matériaux de travail, des éléments de comparaison, que je veux présenter, et non un système tout fait. J'exposerai simplement ce qui ressort des données fournies par l'anatomie et la physiologie humaines, et par l'anatomie comparée, en appliquant ces notions aux deux paires crâniennes que j'ai étudiées dans le précédent chapitre.

Le cordon sympathique crânien semble être représenté (figure 139) par la réunion des filets entourant la carotide interne et par le ganglion cervical supérieur : le groupe trijumeau (1re paire crânienne) lui fournirait au niveau du plexus caverneux les éléments empruntés au centre bulbaire, le groupe pneumogastrique (2e paire crânienne) lui apporterait les filets provenant du même centre.

Si maintenant on rapproche de ce dessin schématique la représentation plus détaillée (fig. 135), des anastomoses crâniennes du sympathique que j'ai figurées d'après la description du professeur Sappey (V. page 308), on voit à quels nerfs correspondent les filets représentés (figure 139) en lignes ponctuées.

Et enfin en comparant à la figure 139 le schéma du rameau

communicant rachidien (fig. 96), on peut prendre une idée générale de la disposition sur laquelle je vais maintenant donner quelques détails.

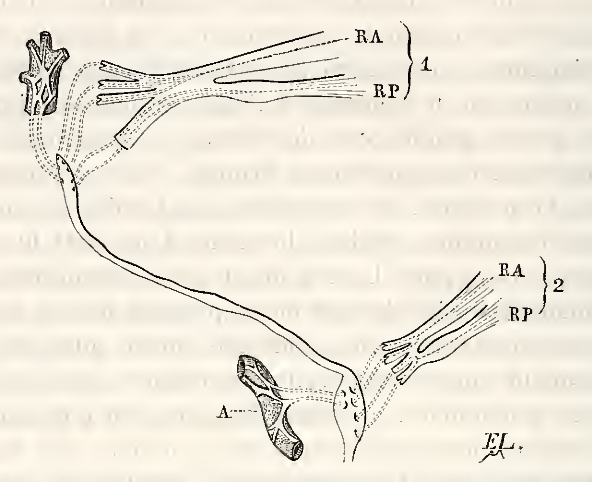


Fig. 139. — 1. 1re paire crânienne, groupe trijumeau (RA, éléments moteurs, moteurs oculaires et partie du facial, RP, éléments sensitifs, trijumeau proprement dit), fournissant (pointillé de la figure) des origines sympathiques au cordon carotidien.

2. 2e paire crânienne, groupe pneumogastrique (RA, éléments moteurs; RP, éléments sensitifs), fournissant (pointillé de la figure) des origines sympathiques au ganglion cervical supérieur.

Anastomoses crâniennes chez l'homme.

I. — *Anastomoses du groupe trijumeau* (figure 135).

Dans la 1re paire crânienne chaque partie constituante fournit son appoint au plexus carotidien (assimilé au cordon céphalique du sympathique), et, en raison même de la multiplicité des éléments qu'on trouve dans ce premier groupe, on doit s'attendre à en voir émerger des filets nombreux provenant soit du trijumeau proprement dit, soit des éléments moteurs qui y sont annexés (nerfs moteurs oculaires et facial). La complexité, loin de surprendre, doit sembler naturelle, car on retrouve ici divisés les éléments sympathiques qui sont agglomérés dans les racines des nerfs rachidiens (figure 96),

puisque ces racines elles-mêmes sont dissociées sous forme de nerfs distincts.

Nous avons à mentionner tout d'abord les filets contenus dans l'élément sensitif soit en deçà, soit au niveau, soit au delà de son renflement ganglionnaire, et les auteurs qui nous renseignent à cet égard de la façon la plus nette, sont ceux-là même qui, à l'époque où ils décrivaient et figuraient les nerfs que le scalpel leur découvrait, ne songeaient point à une détermination théorique : Arnold, Weber, Fœsebeck, Valentin (1) décrivent de nombreux filets entre le tronc du trijumeau, le ganglion, les trois branches d'une part, le plexus carotidien d'autre part. La région du plexus carotidien à laquelle aboutissent ces filets est même précisée avec soin : c'est la lame nerveuse externe de la carotide interne que quelques-uns nomment encore le ganglion carotidien ; ce sont aussi les plexus sphénoïdaux externes situés un peu plus haut. (Il semble d'après les descriptions et les figures des auteurs précédents que ce soit surtout avec la branche externe du plexus carotidien que se font ces anastomoses ; la branche interne du même nerf carotidien semblerait plutôt en rapport avec l'élément moteur de la 1re paire crânienne.)

Quand il s'agit d'indiquer d'une manière positive de quelle portion du trijumeau émanent ces filets de communication, nous ne trouvons plus le même accord entre les anatomistes.

Bock (2) dit expressément que les anastomoses existent entre le ganglion de Gasser, la branche ophthalmique d'une part et le plexus carotidien d'autre part ; mais il ajoute « on n'en trouve pas avec la branche maxillaire supérieure (en outre de la communication avec le ganglion de Meckel), et aucune avec la branche maxillaire inférieure. »

Le professeur Sappey, d'accord avec Bock, dit aussi (1), « quelques auteurs mentionnent encore quelques filets anastomotiques qui se rendraient aux nerfs maxillaire supérieur et maxillaire inférieur ; je n'ai pu jusqu'à présent constater leur existence. »

Je les ai indiqués (figure 135) d'après Langenbeck, Arnold,

(1) Arnold. (*Loc. cit. Surtout, Icon. nerv. cap.*)

(2) Bock. Meissen 1817.

(1) Sappey. (*Névrolog.*, p. 485 et 483.)

Weber, Fœsebeck et Valentin (ils sont représentés par les filets aboutissant au trijumeau 5).

Sans quitter ce sujet des rapports du trijumeau avec le sympathique, je désire insister sur ce point que non-seulement la portion initiale du trijumeau contient des filets empruntés au centre, et en fournit au plexus carotidien, mais encore en envoie à la périphérie par ses branches ophthalmique, maxillaire supérieure, maxillaire inférieure, absolument comme cela s'observe pour les nerfs rachidiens (V. fig. 96 et nerfs rachidiens).

Ces filets centrifuges peuvent être à la fois en continuité avec ceux qui viennent du bulbe et avec des rameaux afférents du plexus carotidien. Je me contente de rappeler qu'au chapitre des nerfs vasculaires de l'orbite j'ai étudié la provenance probable des filets vasculaires de l'œil, à propos des troubles qui suivent les sections du trijumeau et du cordon sympathique cervical.

Les nerfs moteurs oculaires commun et externe sont surtout en rapport, ainsi que le pathétique, avec le plexus caverneux, et peut-être, comme le dit Valentin, dans ce plexus, avec le rameau interne du nerf carotidien. Ces anastomoses sont indiquées sur la figure 135 par les chiffres 3, 6, 4.

C'est de cette région que partent les nerfs accompagnant les branches de la carotide, et ceux des ganglions ophtalmique et sphéno-palatin (1). Je ne reviendrai pas, au sujet du filet carotidien du nerf vidien, sur la direction controversée de ses fibres : j'ai eu occasion d'en parler assez longuement au paragraphe *arrière-fosses nasales* ; je rappellerai seulement que beaucoup d'anatomistes en font une racine crânienne, et quelques-uns la principale du sympathique crânien.

Du reste, pour ce qui concerne les formations ganglionnaires ophthalmique, sphéno-palatine et otique, nous aurons bientôt quelques détails empruntés à l'anatomie comparée.

Je signale, pour compléter les rapports de la 1re paire crânienne avec le plexus carotidien, l'absence de ganglion bien démontrée à la convergence des différents filets indiqués. Quelques auteurs cependant désignent sous le nom de « gan-

(1) Randacio, en 1863, a indiqué des filets caverneux supérieurs pour le ganglion de Meckel. (Cité par Sappey.)

glion carotidien » l'entrelacement de nerfs qui se trouve à ce niveau, mais le caractère ganglionnaire est loin d'y être admis, et le professeur Sappey reporte au ganglion cervical supérieur les filets afférents au plexus carotidien.

II. — *Anastomoses du groupe pneumogastrique.*

Les anastomoses de ce groupe se font d'une manière beaucoup plus directe avec le ganglion cervical supérieur. Dans la figure 135 cette catégorie d'anastomoses a été entièrement dessinée d'après la description du professeur Sappey (*Névrol.* 1872), et la légende suffit pour y reconnaître la provenance des filets qui les constituent.

Il est à remarquer que le facial, qui appartient, comme nous l'avons vu, à l'un et à l'autre groupe, ne s'anastomose point avec le plexus carotidien ; il entre seulement en rapport avec les nerfs sympathiques à la périphérie (V. face), et emporte du reste des éléments vasculaires empruntés au bulbe.

Le ganglion cervical supérieur serait donc l'aboutissant des rameaux anastomotiques, ou, pour continuer notre parallèle, *des rameaux communicants crâniens*. Les détails qui précèdent et ceux que j'ai eu souvent l'occasion de mentionner à propos des effets vasculaires des lésions de ce ganglion portent en effet à l'admettre ainsi.

Tels sont les principaux renseignements que nous fournit l'anatomie descriptive de l'homme au sujet des rapports du sympathique avec les deux groupes des nerfs vertébraux crâniens.

Je vais maintenant y joindre les faits d'anatomie comparée qui viennent à leur appui, et je résumerai en quelques mots les conclusions réservées que je crois possible de déduire de ces différents documents.

Anastomoses crâniennes du sympathique. — Anatomie comparée.

1° *GROUPE TRIJUMEAU.*

Trijumeau proprement dit.

Cuvier décrit le nerf vidien chez les *mammifères* comme

fourni par le ganglion de Meckel et *se rendant au rameau carotidien* externe (1).

Chez les *oiseaux*, Schlemm indique un rameau *récurrent* de la branche ophthalmique, l'analogue, d'après lui, du nerf vidien (filet récurrent chez le dindon).

Le même détail est reproduit par Siebold et Stannius (2), qui résument les recherches de Weber et de Schlemm : deux rameaux ascendants partent du ganglion cervical supérieur; l'un va se réunir au trijumeau, l'autre s'engage dans le *canal carotidien*, s'anastomose avec des filets du glosso-pharyngien et du facial, et quitte ce canal pour se rendre, *comme nerf vidien*, le long de la paroi interne de l'orbite.

Chez les *reptiles* (testudo europæa), Bojanus (3) représente le sympathique comme accompagnant dans le crâne l'*artère carotide* et s'unissant au nerf vidien et au facial.

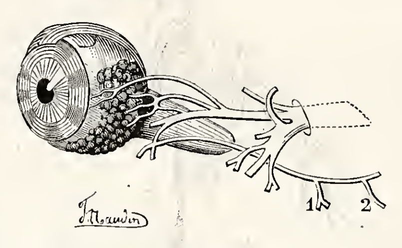


Fig. 140. — (Empruntée à Bojanus.) 1, filets nasaux du nerf vidien. — 2, « rameau sympathique du nerf vidien » se rendant (?) au grand sympathique dans le canal carotidien.

Swan (4) figure chez le caret (testudo imbricata) le cordon sympathique distinct le long du cou, envoyant une de ses branches, avec une division de l'artère carotide, dans un canal de la base du crâne, donnant un filament au facial, et communiquant avec le second rameau de la 5ᵉ paire.

Chez les *ophidiens* (boa constrictor), Swan décrit deux rameaux partant du ganglion cervical supérieur et allant s'anastomoser avec des rameaux *de la seconde branche* de la 5ᵉ paire, en formant un petit renflement à chaque point d'union. On pourrait, d'après Cuvier, assimiler au ganglion sphéno-pala-

(1) Cuvier. *Anat. comparée.*
(2) Siebold et Stannius (*Manuel d'anatomie*). *In Jobert.* (*Ann. sc. nat.*, 1869).
(3) Bojanus. (*Anat. Testud. Europ.*, 1819, planche XXXVI.)
(4) Swan. (*Illustrat. anat. comp.*, Londres 1837.)

tin un de ces renflements qui donne un filet à la membrane du nez.

Chez les *poissons*, le sympathique représente à la base du crâne un filet nerveux avec filets de communication pour *chaque paire vertébrale*. On peut suivre le sympathique jusqu'à la 5e paire aussi bien chez les poissons osseux que chez les poissons cartilagineux, quoiqu'on ait nié qu'il existât chez ces derniers (1).

Selon Gegenbaüer (2), le sympathique commence au trijumeau chez les poissons (V. fig. 141), avec un ou plusieurs ganglions recevant des racines de ce nerf.

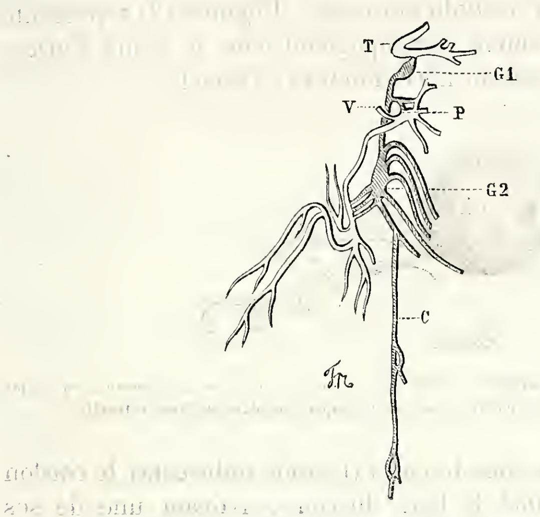


Fig. 141. — Sympathique de l'Esox Lucius (Gegenbaüer).
G1, 1er ganglion sympathique né de la branche inferieure du trijumeau T.
P. Ganglion du pneumogastr. V fournissant une racine au 2e ganglion.
G. Sympath. lequel s'unit aux 4 premiers nerfs spinaux. — C, cordon sympathique.

Cette revue, assurément incomplète, est suffisante cependant pour montrer que les rapports, indiqués chez l'homme entre le groupe trijumeau et le sympathique, se retrouvent chez les animaux vertébrés, et, je noterai, dans les mêmes conditions, toujours avec des nerfs sympathiques carotidiens, ce qui justifierait dans une certaine mesure *l'assimilation que je pre-*

(1) Carus et d'Alton. (*De syst. nerv. vita et structura in genere.* Leipsick 1853.) (Trad. latine Thienemann.)

(2) Gegenbaüer. (*Anat. comp. nerfs viscéraux.*)

sentais en commençant entre les plexus carotidiens et un cordon céphalique sympathique.

2° *GROUPE PNEUMOGASTRIQUE.*

Comme chez l'homme, les filets d'union entre le sympathique et le groupe pneumogastrique sont remarquables chez les animaux par leur extrême brièveté ; souvent même il y a fusion à la base du crâne entre les divers éléments de la paire crânienne postérieure et le sympathique.

Quelques exemples affirmeront cette seconde série d'anastomoses.

Chez les *oiseaux*, l'un des rameaux ascendants du ganglion cervical supérieur s'anastomose avec des filets du glosso-pharyngien et du facial (Siebold et Stannius).

Chez les *reptiles,* Müller indique, pour le lézard, la fusion de la portion céphalique du sympathique et du vague.

Il en est de même chez les serpents (1).

Chez les *poissons*, le sympathique est uni au vague à la base du crane (V. fig. 141), et quelquefois on a pu croire qu'il était remplacé par ce nerf (chez la lamproie, par exemple) (2).

Swan l'a figuré dans la raie.

Gegenbaüer a décrit le pneumogastrique comme fournissant des filets qui pénètrent ordinairement dans le 1er ganglion cervical.

Le rapprochement de ce nouveau paragraphe et du paragraphe correspondant de l'anatomie de l'homme nous confirme encore dans cette idée que le *groupe vague fournit au sympathique des rameaux constants, comme le groupe trijumeau.*

CONCLUSIONS.

Dans la *PREMIÈRE PARTIE* de ce travail, j'ai essayé de réunir les preuves anatomiques (dégénérescence wallérienne) et les preuves physiologiques et cliniques sur lesquelles repose la détermination des nerfs vasculaires des membres, et j'ai conclu avec Pflüger, Schiff, Cyon, Vulpian que les vais-

(1) Weber. (*Anat. comp. nerv. symp. — Meckel's Archiv.*, 1827.)

(2) Carus et d'Alton. (*Loc. cit.*)

seaux reçoivent leurs nerfs : 1° *des filets sympathiques libres*, provenant directement des ganglions de la chaîne ; 2° *des filets du même ordre contenus dans les nerfs mixtes rachidiens* et empruntés par ceux-ci à la moelle et aux ganglions.

Dans la *SECONDE PARTIE*, j'ai passé en revue les diverses régions de la face et du crâne, indiquant, pour chacune d'elles, les nerfs vasculaires et leur provenance, d'après l'anatomie descriptive et l'expérimentation physiologique ; j'ai été conduit ainsi à admettre :

1° Que les vaisseaux superficiels et profonds de la face étaient innervés :

a) Par les filets sympathiques libres provenant du ganglion cervical supérieur et du cordon prévertébral ;

b) Par des branches du facial et du trijumeau.

2° Que les vaisseaux de l'oreille recevaient leurs nerfs : *a*) du sympathique libre ; *b*) du facial et du trijumeau ; *c*) du plexus cervical.

3° Que les vaisseaux des téguments du crâne recevaient également les leurs : *a*) du sympathique libre ; *b*) du facial et du trijumeau ; *c*) du plexus cervical.

4° Que les vaisseaux encéphaliques étaient innervés :

a) Par le plexus carotidien, en tenant compte, pour la signification physiologique de ces filets sympathiques, des anastomoses avec les nerfs crâniens ;

b) Par le plexus vertébral, en tenant compte, au même point de vue, des anastomoses des nerfs cervicaux avec le nerf vertébral.

Dans cette seconde partie ont été étudiés les trois points complémentaires suivants :

1° Examen des principales théories de la dilatation vasculaire produite par l'excitation de certains nerfs (dilatation vasculaire active).

Conclusion. — « Nous ne sommes pas certain de posséder la véritable théorie de la dilatation active » (empruntée au professeur Vulpian).

2° Étude des nerfs sécréteurs.

Conclusion. — Indépendance du facteur circulation par

rapport au facteur sécrétion, et, selon toute probabilité, subordination du second au premier.

3° Notes sur le nerf vertébral considéré comme cordon complémentaire du sympathique au cou, et non comme simple branche du ganglion cervical inférieur.

Conclusion. — Nécessité de recherches appuyées sur l'anatomie comparée. Indications à ce sujet.

La *TROISIÈME PARTIE*, relative aux rapports du sympathique avec les nerfs crâniens, ne comporte que les conclusions restreintes suivantes :

1° La segmentation vertébrale du crâne et la réduction des nerfs crâniens (anatomie humaine, anatomie comparée), à deux groupes représentant chacun une paire rachidienne, permettent de chercher dans les anastomoses que ces nerfs présentent avec le sympathique crânien (nerfs carotidiens et ganglions) les analogues des rameaux communicants rachidiens.

2° Mais nous ne pouvons actuellement conclure qu'en faveur de l'analogie ; l'identité serait peut-être démontrée par l'application de la méthode wallérienne aux nerfs du groupe trijumeau et du groupe pneumogastrique, ainsi qu'aux rameaux qui les unissent aux prolongements crâniens du sympathique.

IX.

PRESSION ET VITESSE DU SANG.

I. — Pression et vitesse du sang dans les artères.

Dans les expériences sur les mouvements du sang, on demande au manomètre des indications qu'il ne saurait fournir. La pression du sang résulte, non-seulement de l'action impulsive du cœur, mais aussi du plus ou moins de résistance que présentent les vaisseaux capillaires au passage du sang. — Le but de ce mémoire est de chercher un critérium qui permette de savoir d'où provient un changement qu'on observe dans la pression du sang.

Appareils qui mesurent la pression du sang ; défauts et qualités de chacun d'eux. — Pression constante et pression variable. — Sphygmographe à transmission.

Appareils destinés à mesurer la vitesse du sang. — Nouvel appareil basé sur l'emploi de deux tubes de Pitot. — Vitesse constante et vitesse variable.

Les mots pression du sang dans les artères et tension artérielle sont à peu près synonymes ; en tout cas, on les trouve employés presque indifféremment par les divers auteurs. Ceux qui emploient le mot de *pression du sang* dans les artères assimilent les phénomènes de la circulation artérielle au mouvement des liquides dans les conduits, sous l'influence de la charge ou pression d'un réservoir élevé. Mais le mot de *tension artérielle* exprime mieux la nature de la force qui pousse le sang dans les artères ; ces vaisseaux, en effet, distendus par l'action impulsive du cœur, pressent, comme un ressort sur le sang qu'ils renferment et l'expulsent par la seule voie qui lui soit ouverte : à travers les vaisseaux capillaires.

Depuis que l'emploi du manomètre permet de mesurer avec précision cette force impulsive du sang, tous les physiologistes expérimentateurs appliquent, à chaque instant, ces instruments. Ainsi, chaque fois qu'on étudie l'action des nerfs sur les mouvements du cœur, c'est le manomètre qu'on interroge ; c'est à lui aussi qu'on demande les effets que la respiration produit sur la circulation artérielle ; c'est encore lui qui, depuis la découverte des nerfs vaso-moteurs, doit renseigner sur l'état de la circulation capillaire.

Or, pour l'interprétation des mesures manométriques, on oublie trop souvent que la pression du sang dans les artères est soumise à deux influences antagonistes : d'une part, à l'*action impulsive* du cœur qui pousse le sang avec plus ou moins de force, d'autre part, à l'*action modératrice* des petits vaisseaux qui, suivant leur resserrement plus ou moins énergique, retiennent le sang dans les artères ou le laissent facilement passer dans les veines.

Chaque fois qu'il constate une variation dans la hauteur du manomètre appliqué sur un artère, l'expérimentateur doit se demander quel est celui des deux facteurs de la tension artérielle qui a varié, ou bien si les deux facteurs, la puissance et la résistance, ont été modifiés à la fois. En l'absence d'un critérium qui permette de trancher en toute sûreté cette question litigieuse, bien souvent les physiologistes ont choisi l'hypothèse qui s'accordait le mieux avec leurs idées préconçues. Cette imprudente conclusion a donné lieu à bien des controverses : celles, par exemple, qui se sont élevées entre Von Bezold d'un côté, Ludwig et Thiry de l'autre. Von Bezold, voyant que chaque tronçon de la moelle épinière, suivant qu'on l'excite ou qu'on le détruit, modifie la fréquence des mouvements du cœur, concluait que chacun de ces tronçons fournit des origines aux nerfs cardiaques. Pour les adversaires de Bezold, c'était, au contraire, sur les vaso-moteurs qu'agissait la section de la moelle épinière, le cœur n'en éprouvant que des effets consécutifs.

J'ai été moi-même en butte à des constestations du même genre, lorsque je signalai, en 1858, l'influence que la tension artérielle exerce sur les battements du cœur.

Considérant comme trop complexes les expériences où l'on

faisait intervenir la section ou la galvanisation des nerfs, et ne choisissant que des cas bien simples où, sans faire éprouver la moindre douleur à l'animal, on modifiait le cours du sang dans les artères, je constatai que, sous l'influence de changements dans la tension artérielle, le cœur change secondairement la fréquence de ses pulsations, et formulait ainsi la loi qui préside à cette relation. « *Toutes choses égales du côté de l'innervation du cœur,* la fréquence de ses battements diminue quand la tension artérielle augmente et réciproquement. »

Cette théorie était appuyée sur un grand nombre de faits, tous assez simples, pour qu'on pût aisément se convaincre qu'en agissant primitivement sur la tension artérielle toute seulé, on faisait varier secondairement la fréquence des battements du cœur (1). Ma théorie fut bien accueillie d'abord ; chacun pouvait, en effet, contrôler les expériences qui lui avaient servi de base. Mais la formule que j'avais employée était sans doute trop peu explicite, car bientôt il ne fut tenu aucun compte de cette réserve importante : *toutes choses égales du côté de l'innervation du cœur.* On m'opposa des cas où la fréquence des battements cardiaques était accrue en même temps que la pression artérielle était élevée ; d'autres où les battements étaient rares avec une pression faible. Il suffirait de rappeler que si la loi ci-dessus énoncée est interprétée avec soin, elle répond à toutes les objections. En effet, la tension artérielle ayant deux facteurs : la force impulsive du cœur et la résistance que le sang éprouve pour sortir des artères, je n'ai eu en vue que le cas, facile à produire, où l'on agit sur le facteur résistance. Dans ce cas seulement, on doit trouver le rapport inverse : *Pression artérielle forte, battements du cœur rares. Pression faible, battements fréquents.*

Si l'on envisage la condition inverse, celle où l'écoulement capillaire n'étant pas modifié, une influence nerveuse, directe ou réflexe, accélère les mouvements du cœur, il est clair que le rapport sera changé et deviendra : *Battements du cœur fré-*

(1) De ce nombre étaient les effets de la saignée, de la compression et du relâchement des troncs artériels volumineux, des attitudes, de l'action musculaire et du repos, etc.

quents, pression artérielle forte. — Battements rares, pression faible.

Encore faut-il admettre que les battements du cœur, tout en changeant de fréquence, gardent leur valeur au point de vue du volume de sang que chacun d'eux envoie dans les artères (1).

On voit que si l'on ne tient pas compte du siége où l'influence primitive s'est produite, si l'on confond les actions nerveuses cardiaques avec les actions vaso-motrices périphériques, il n'est plus possible d'établir une relation entre la pression du sang et la fréquence des battements du cœur. C'est ce qui est arrivé.

La tendance des physiologistes allemands était, il y a quelque temps, d'admettre, suivant la vieille théorie de Blackley, que plus la pression est forte, plus le cœur précipite ses battements (2).

Comment, dès lors, expliquer que si l'on ouvre une artère le cœur s'accélère? Pourquoi, si l'on comprime l'aorte, les battements sont-ils moins fréquents?

La discussion se prolongera sans fin, sur ce terrain, si nous ne cherchons un moyen certain de savoir, lorsque la tension artérielle varie, si c'est sous l'influence du cœur, ou par suite de changements dans la circulation périphérique.

Le but des études qui vont suivre est de chercher ce critérium.

Des appareils employés pour mesurer la pression du sang.

La pression du sang dans les artères se mesure par les procédés mêmes que les physiciens emploient pour apprécier

(1) Dans certains cas où la circulation pulmonaire entravée ne laisse arriver que peu de sang au cœur gauche, on voit des battements très-rapides s'accompagner de très-faible tension artérielle, parce que chaque systole du cœur aortique n'envoie qu'une ondée incomplète.

(2) Les expériences de M. Cyon tendaient à établir, entre la pression et la fréquence, une relation inverse de celle que j'avais signalée ; d'après les recherches récentes de M. Nawrocki (Leipsick, 1874), la pression artérielle forte ou faible serait sans influence sur la fréquence des battements du cœur, et il n'y aurait pas lieu de chercher entre ces phénomènes un rapport de causalité.

celle des liquides, des gaz ou des vapeurs, c'est-à-dire au moyen des manomètres. On connaît les transformations successives qu'a subies le manomètre physiologique : ce fut d'abord, entre les mains de Hales, un tube simple dans lequel le sang lui-même, s'élevant à une hauteur d'environ 3 mètres, indiquait la pression sous laquelle il tend à s'échapper des artères ; puis le manomètre à mercure de Poiseuille, moins embarrassant à cause de la faible hauteur de la colonne de mercure (20 centimètres environ). Enfin, le manomètre à mercure modifié par Ludwig qui, sous le nom de *kymographion,* en fit un appareil inscripteur, l'un des plus précieux que la physiologie possède.

L'emploi des manomètres révéla tout d'abord que la pression du sang dans les artères n'est pas fixe, mais qu'elle subit des oscillations qui tiennent à l'action intermittente du cœur.

La colonne de mercure peut osciller, par exemple, entre 20 et 24 centimètres. On a donc admis, en pratique, deux pressions : la *pression constante* qui serait, dans le cas ci-dessus, de 20 centimètres, et la *pression variable* qui aurait pour valeur 4 centimètres seulement. On verra plus loin comment il faut comprendre ces deux éléments de la pression du sang, et combien il serait erroné de croire que la hauteur des oscillations du mercure exprime l'énergie des systoles ventriculaires. Mais, je le répète, sans rien préjuger de leur origine, il est bon de distinguer, en pratique, la pression constante et la pression variable, d'autant plus, qu'en cela, on se conforme à l'usage établi.

J'ai longuement insisté, dans d'autres publications (1), sur les inconvénients des manomètres à mercure, lorsqu'il s'agit d'estimer la valeur de pressions qui varient d'une manière rapide. L'inertie du mercure donne naissance à des oscillations qui altèrent la valeur absolue des indications de l'appareil et éteignent les petites variations que l'action cardiaque imprime à la pression du sang. Dans les expériences que j'ai faites avec Chauveau, nous avons recouru à des appareils manométriques basés sur l'emploi d'un corps élastique de faible

(1) *Physiol. méd.*, p. 143.

masse substitué à celui d'un corps pesant comme le mercure. Le *sphygmoscope* décrit dans les mémoires qui précèdent (voy. p. 52, fig. 30) traduit fidèlement les phases diverses de la pression variable. Le professeur Fick a publié plus récemment des expériences faites avec un appareil (*Feder Kymographion*) basé sur l'emploi du manomètre à ressort de Bourdon.

Mais, jusqu'ici, chacun de ces appareils a ses qualités et ses défauts : si les manomètres élastiques sont seuls capables de signaler les phases de la pression variable, rien ne saurait remplacer le manomètre à mercure lorsqu'il s'agit d'estimer la valeur absolue d'une pression constante. Avec certaines modifications, on peut faire de cet instrument un excellent indicateur des pressions moyennes. Il suffit, pour cela, d'éteindre entièrement les oscillations de l'appareil, en forçant le mercure à traverser un espace rétréci (manomètre compensateur) (1) ; une amélioration a été introduite par Setschenow (2) : elle consiste à placer, sur le trajet du mercure, un robinet qu'on ferme graduellement jusqu'à ce que les oscillations soient presque éteintes (3).

Enfin, une préoccupation qui doit guider dans le choix d'un manomètre est de proportionner le volume de la colonne de mercure à celui de l'animal sur lequel on opère. L'élévation du mercure ne peut s'effectuer qu'autant qu'il entre dans l'appareil un volume de sang égal au volume du mercure déplacé ; de sorte que, si l'on appliquait sur un petit animal un manomètre volumineux, il se ferait, dans l'intérieur de l'appareil, une véritable hémorrhagie qui altérerait considérablement les conditions de la pression du sang. Aussi, dans l'emploi des manomètres inscripteurs qui doivent avoir de larges colonnes de mercure, faut-il s'adresser à des animaux de forte taille.

La pression variable est très-fidèlement exprimée par le sphygmographe construit dans les conditions que j'ai indiquées, c'est-à-dire avec un ressort pour exercer la pression

(1) *Physiol. méd. de la circulation du sang*, p. 144.

(2) *Henle und Pfeuffer's Zeitschr.*, Bd. XII, s. 33.

(3) Quand les oscillations sont très-réduites, leur forme se rapproche beaucoup plus de l'expression réelle de la pression du sang.

sur l'artère, et avec un levier très-léger pour amplifier les mouvements du ressort. Je n'ai, jusqu'ici, rien trouvé de plus sensible et de plus fidèle que cet instrument pour donner les caractères du pouls artériel ; mais il est avantageux, dans certains cas, de faire du sphygmographe un instrument à transmission. Voici la disposition que j'ai adoptée :

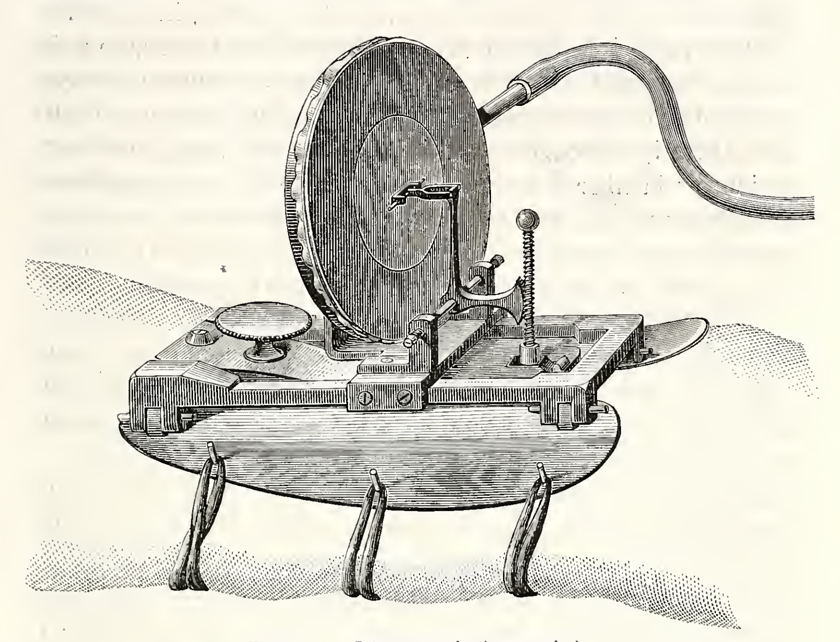


Fig. 142. — Sphygmographe à transmission.

La monture ordinaire du sphygmographe est conservée ; on la voit dans la figure 142 appliquée sur le poignet. La vis verticale qui, reliée au ressort de pression, reçoit les mouvements du pouls, au lieu de s'engrener à la façon ordinaire avec l'axe du levier inscripteur, s'engrène avec une pièce basculante qui actionne la membrane d'un tambour à air. Ce tambour explorateur du pouls est relié par un tube avec un tambour inscripteur. L'inspection de la figure montre comment le soulèvement du ressort et de la vis agit, par un mouvement de sonnette, pour comprimer la membrane du premier tambour, ce qui fait soulever le levier du second. Dans l'emploi de cet appareil, il faut donner aux membranes de caout-

chouc de l'un et de l'autre tambour une tension très-faible et diminuer, autant que possible, les frottements du levier sur le papier. Sans ces précautions, la pulsation inscrite serait très-affaiblie.

On obtient, avec le *sphygmographe à transmission*, des tracés d'une longueur indéfinie, si l'on écrit en spirale sur un cylindre de grande longueur. On peut, en outre, inscrire la pulsation artérielle en même temps que celle du cœur, ce qui fournit des éléments de comparaisons très-importants entre la forme de ces deux sortes de pulsations. Enfin, comme l'appareil inscripteur est distinct de l'explorateur, le sujet en expérience a la liberté de prendre toutes les attitudes possibles pendant que le tracé s'inscrit.

Des appareils employés pour mesurer la vitesse du sang.

La première détermination de cette vitesse appartient à Volkmann, dont l'ingénieux *hémodromographe* (1) a permis de rectifier les erreurs qui régnaient sur la valeur de cette vitesse. Hales avait cru pouvoir déduire la vitesse du sang de la pression à laquelle ce liquide est soumis dans les artères. On sait aujourd'hui, que la vitesse du sang résulte de la différence qui existe entre la pression qui pousse chaque molécule de liquide et celle que cette molécule rencontre devant elle à titre d'obstacle à son mouvement. Ludwig modifia avantageusement la disposition imaginée par Volkmann, de façon à mesurer la quantité de sang qui avait traversé une artère au bout d'un temps assez long, ce qui fournissait une mesure d'autant plus exacte de la vitesse moyenne du sang (2). Mais cet appareil paraît devoir être abandonné dans la plupart des cas, pour ceux qui fournissent l'expression graphique de la vitesse du sang.

C'est à Vierordt (3) qu'on doit le premier inscripteur de la vitesse du sang ; il est basé sur l'emploi du pendule *hydrodynamique*. On connaît trop la disposition de cet instrument pour que je le décrive de nouveau, je dirai seulement que, dans la

(1) Voir les *Traités de pyhsiologie :* Longet, t. II, p. 205, Béclard, p. 275.

(2) Dogiel. *Arbeiten*, Ludwig. (*Die ausmessung der*) *Ilromenden Blut volumina.* — 1868.

(3) Vierordt Hemadynamick.

transmission des mouvements du pendule à l'appareil inscripteur, Vierordt ne s'est pas occupé suffisamment de l'inertie des organes intermédiaires, et qu'il a obtenu, comme avec son sphygmographe, des indications déformées. Chauveau, reprenant le principe de Vierordt, a construit un excellent instrument qui paraît traduire, d'une manière très-fidèle, les variations les plus délicates de la pression du sang. Je ne puis m'étendre sur la description de cet appareil qui est basé sur le principe suivant : une aiguille légère plonge dans un vaisseau ; le courant sanguin la dévie, et l'élasticité de la paroi que l'aiguille traverse la ramène dans sa position, si le courant cesse à l'intérieur. Cet instrument a subi des modifications nombreuses entre les mains de son auteur. D'abord simple indicateur de la vitesse du sang d'après les mouvements d'une aiguille sur un cadran (1), il a été transformé en appareil inscripteur direct. Plus tard enfin, il est devenu appareil à transmission destiné à agir sur le tambour à levier. C'est, je crois, sous cette dernière forme que Chauveau l'emploie aujourd'hui.

L'*Hémadromographe* de Chauveau montre que dans la vitesse du sang on doit, comme dans la pression, distinguer l'état constant et l'état variable ; c'est-à-dire qu'ordinairement il y a toujours un certain degré de vitesse, qui fait que l'aiguille ne revient jamais au zéro, mais que la déviation de l'aiguille augmente à chaque systole du cœur, et diminue à chaque diastole.

J'ai moi-même imaginé un explorateur de la vitesse du sang qui me semble devoir être plus sensible encore que celui de Chauveau, et qui transmet au tambour à levier ordinaire la vitesse du sang avec ses variations.

Voulant, pour résoudre certaines questions d'hémodynamique, inscrire la vitesse du liquide qui circule dans le schéma, je recourus à l'appareil de Chauveau, mais je n'ob-

(1) Voy. Chauveau, Bertolus et Laroyenne, *Vitesse de la circulation dans les artères du cheval. Journ. de la physiol. de l'homme et des animaux*, t. III, 1860, p. 695. — Lortet, *Recherches sur la vitesse du cours du sang*. Paris, 1867, in-4°. J.-B. Baillière. — Rebatel, *Recherches sur la circulation dans les artères coronaires*.

tins que des indications très-faibles, ce qui tenait à ce que, dans le schéma, le cours du sang n'était pas assez rapide, et surtout à ce que les tubes qui représentent les artères étaient trop peu volumineux, trop étroits par conséquent, pour un appareil destiné à s'appliquer aux artères d'un cheval.

Je construisis, pour ces recherches, un instrument qui me fournit d'excellents résultats. L'appareil est basé sur le principe des *tubes de Pitot* (1); ce principe est le suivant: les *piézomètres* (2) mesurent ce qu'on appelle, en hydraulique, la *pression latérale* du liquide contre les parois du tuyau d'écoulement. Si ces tubes, au lieu d'être simplement branchés sur la paroi, se prolongeaient dans l'intérieur du tuyau, puis, se coudant à angle droit, venaient présenter leurs ouvertures, soit contre le courant du liquide, soit en sens inverse, on verrait que le niveau de la colonne diffère de celui des piézomètres : il s'élèverait plus haut dans le premier cas, moins haut dans le second.

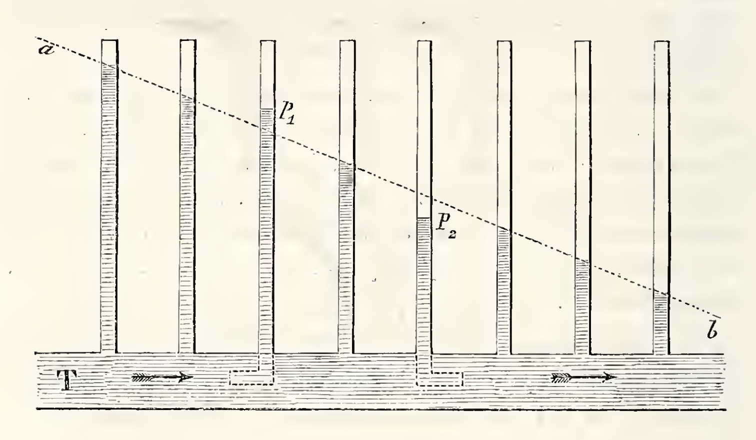


Fig. 143. — Tube T dans lequel se fait un écoulement de liquide dans le sens des flèches *a*, *b*, niveaux d'une série de piézomètres. — P1 et P2, tubes de Pitot, diversement orientés ; leurs niveaux diffèrent de ceux des piézomètres.

Soit (fig.143) un tuyau T dans lequel coule un liquide, suivant la direction des flèches. Sur ce tube, une série de piézo-

(1) Pour la théorie, rapprocher ce phénomène de ceux qui sont décrits dans le Mémoire nº VI, sur la *Résistance de l'air*.

(2) Tubes de verre branchés sur une conduite d'eau et dans lesquels ce liquide s'élève à différentes hauteurs.

mètres ont leurs niveaux suivant la ligne *ab* oblique descendante. Mais, parmi les piézomètres, se trouvent deux tubes de Pitot, P1 et P2. Le premier de ces tubes a son orifice coudé à l'intérieur du tuyau d'écoulement et tourné contre le courant du liquide. Le niveau de P1 est supérieur à celui des piézomètres ; P2, au contraire, a son niveau plus bas que les piézomètres, parce que son ouverture est tournée en sens inverse du courant du liquide.

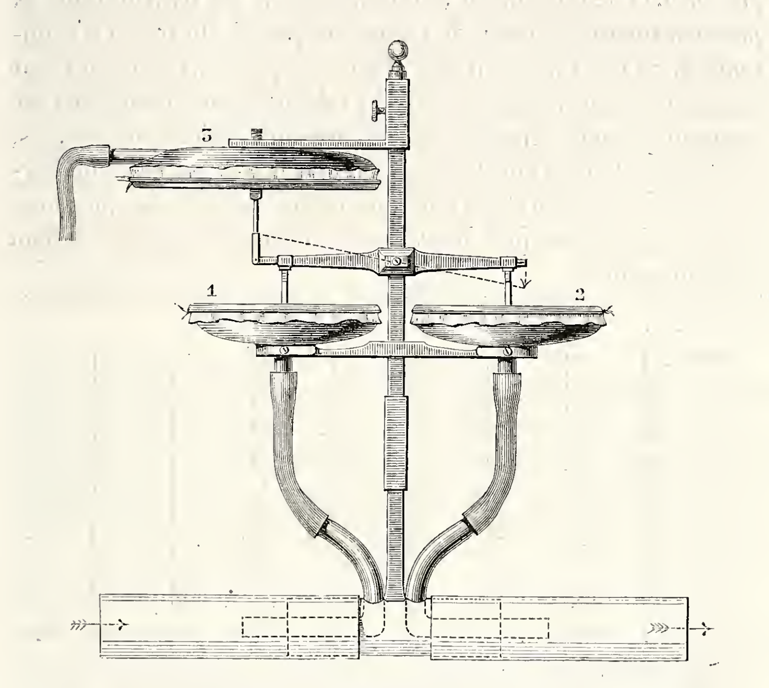


Fig. 144. — Appareil destiné à inscrire la vitesse du liquide dans un tube ou dans une artère.

Étant donné (fig. 144) un tuyau de verre dans lequel se fait un écoulement de liquide, suivant la direction des flèches ; deux tubes de Pitot plongent dans le courant et se rendent chacun à un tambour à membrane 1 et 2. Le soulèvement de ces membranes sera plus ou moins énergique suivant la pression sous laquelle coule le liquide dans le tuyau ; de plus, il y aura une différence dans l'intensité de ce soulèvement, car les deux tubes de Pitot sont orientés en sens inverse l'un de l'autre ;

enfin, cette différence augmentera avec la vitesse d'écoulement, quelle que soit la charge sous laquelle le liquide circule dans le conduit.

Il faut donc inscrire cette différence de pression pour obtenir la mesure de la vitesse du courant. A cet effet, deux disques d'aluminium placés, comme à l'ordinaire, sur les membranes des tambours, sont reliés par des tiges verticales articulées avec un fléau transversal analogue à celui d'une balance. Ce fléau, susceptible de pivoter autour d'un axe qui traverse le bâtis de l'appareil, reste horizontal si les deux membranes sont soulevées avec la même force, mais s'incline, suivant la direction marquée par une ligne ponctuée, si la pression est plus grande dans le tambour 1 que dans le tambour 2. C'est ce qui arrive quand le liquide est animé de vitesse dans le tuyau T. On utilise l'inclinaison du fléau pour comprimer la membrane d'un 3e tambour qui signale ainsi la vitesse, et la transmet à un tambour à levier inscripteur, suivant la méthode habituelle.

Quand on arrête le courant du liquide au moyen d'un obstacle en aval de l'instrument, la pression augmente ; mais comme elle est égale dans les deux tambours, l'effort de ces deux pressions se neutralise entièrement sur les deux bras du fléau transversal. Dès que l'écoulement se produit, l'inégalité de pression apparaît et le fléau s'incline avec plus ou moins d'énergie.

On remarquera que la vitesse produit une compression de l'air dans le tambour 3, ce qui produira une élévation de la courbe tracée.

Tel est le principe d'après lequel est construit mon appareil ; j'ajouterai que si l'on place des robinets sur le trajet des tubes de Pitot, on éteint les variations de pression qui se produisent dans les tambours. L'appareil trace alors l'indication de la vitesse moyenne, de même qu'un manomètre compensateur donne la moyenne de pression. Pour s'appliquer sur les artères d'un animal, l'instrument doit subir des modifications particulières dont il sera question plus tard.

II. — De la pression et de la vitesse constantes.

Répartition de la pression dans un système de conduits; lois de Bernouilli. — Pour déterminer les conditions hydrauliques de l'écoulement dans un tube, il faut y mesurer à la fois la pression et la vitesse du liquide. — Loi de Bernouilli appliquée aux conditions de la circulation du sang. — La vitesse et la pression éprouvent des changements parallèles quand ces changements tiennent à une modification de la force du cœur. — La vitesse et la pression subissent des changements de sens inverse sous l'influence de modifications dans la résistance des capillaires. — Influences réciproques des changements de l'état circulatoire en des points différents de l'appareil sanguin. Un obstacle à l'écoulement du sang, dans une partie de l'appareil, produit, dans les autres parties, le même effet qu'un accroissement de l'impulsion du cœur.

Répartition de la pression constante dans le système artériel.

Les expériences de Bernouilli établissent d'une manière indiscutable que, dans tout système de conduits où il existe un mouvement du liquide, la pression va toujours en décroissant dans le sens du courant. Les traités classiques de physiologie rapportent tous ces expériences, qui fournissent l'une des notions préliminaires les plus utiles pour aborder l'étude de la circulation du sang.

Nous reproduisons ici, avec quelques variantes, ces expériences mémorables, en les modifiant dans le but spécial de montrer comment varie la pression dans le système artériel, suivant que c'est la force impulsive du cœur ou la résistance des capillaires qui change.

Soit (fig. 145) un réservoir R plein d'eau, communiquant avec un tube horizontal d'écoulement sur lequel sont branchés verticalement une série de tubes (*piézomètres*) équidistants, dans lesquels s'élèvera plus ou moins la colonne liquide, suivant l'intensité de la pression latérale au point dont chacun des piézomètres se détache.

Supposons que le niveau du liquide soit en 1, dans le réservoir, et que le tube d'écoulement soit coupé en 2, de façon à

donner issue au liquide, en ce point, par un orifice dont la largeur serait la section entière du tube; les niveaux des piézomètres s'échelonneront suivant une ligne droite qui joindrait le niveau 1 du réservoir à l'orifice d'écoulement 2. Cette

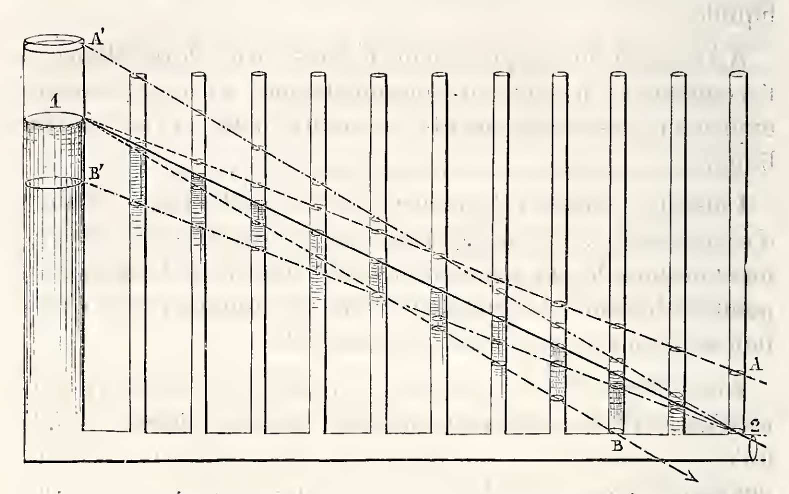


Fig. 145. — Piézomètres et variations de leurs niveaux suivant les changements dans l'afflux ou l'écoulement du liquide.

pente des niveaux tient à l'existence d'un écoulement qui, d'un piézomètre à l'autre, consomme, par les résistances dites de frottement, une partie de la force motrice que représente la charge du réservoir. Si l'écoulement était supprimé, toute résistance de frottement disparaîtrait bien vite, et il tendrait à s'établir dans tous les piézomètres un niveau horizontal, d'après le principe d'équilibre des liquides dans les vases communiquants.

Ainsi, la pente des niveaux, c'est-à-dire la décroissance de pression, résulte de l'écoulement lui-même; elle est donc sous l'influence des changements de hauteur du liquide dans le réservoir et des changements de résistance du tube (longueur et diamètre).

Faisons varier la hauteur du liquide dans le réservoir R, tout en laissant l'écoulement se faire par l'orifice 2. Si le niveau du réservoir est élevé jusqu'en A' la pente des niveaux piézométriques est plus rapide que tout à l'heure; elle suit la ligne A′ 2. Si le niveau du réservoir tombe en B′ la ligne des

niveaux devient B′ 2 ; elle offre une pente moins rapide. Or, comme l'écoulement croît avec la charge, on peut remarquer déjà que, plus les niveaux piézométriques s'éloignent de l'horizontalité, plus ils expriment un écoulement rapide du liquide.

A l'inverse du cas précédent, faisons varier la résistance à l'écoulement ; les niveaux piézométriques varieront encore, exprimant les changements survenus dans la vitesse du liquide.

Laissant le niveau du réservoir en 1, prolongeons le tube d'écoulement, ce qui augmentera les résistances au mouvement du liquide ; la pente du niveau sera 1 A. Coupons au point B le tube d'écoulement, afin de diminuer les résistances, les niveaux suivront la ligne 1 B.

Ainsi, tout changement dans la pente des niveaux piézométriques exprimera un changement dans la vitesse, quelle qu'en soit la cause (1). Pour déterminer cette cause, il faut, en même temps que la pente des piézomètres, étudier les changements absolus qui se produisent dans la hauteur des niveaux.

Si l'on examine ce qui se passe dans l'expérience précédente, suivant qu'on fait varier la pression du liquide ou la résistance à l'écoulement, on voit qu'une même pente des niveaux piézométriques, c'est-à-dire une même vitesse d'écoulement du liquide, peut se produire dans des conditions très-différentes. La figure 145 est disposée de façon à présenter deux lignes de niveaux parallèles entre elles ; 1 A et B′ 2 expriment que le liquide coulait dans le tube avec la même vitesse, moindre que celle que présente la ligne 1 2. Or, cette diminution de vitesse a été obtenue dans un cas, 1 A, par l'accroissement des résistances ; dans l'autre, B′ 2, par la diminution de la charge d'afflux. Inversement, les lignes A′ 2 et 1 B expriment un accroissement de vitesse, mais celui-ci tient, dans le premier cas, à l'accroissement de l'afflux, dans le second à la diminution des résistances.

(1) La différence de niveau de deux piézomètres consécutifs est proportionnelle au carré des vitesses d'écoulement.

Pour savoir à quelle cause est dû un changement de vitesse, il suffit de voir comment varie la hauteur absolue des piézomètres. — Si la vitesse s'accroît ou diminue, en même temps que la pression, la modification tient à un changement dans la force d'afflux. — Si la vitesse et la pression changent en sens inverse, c'est la résistance à l'écoulement qui a varié.

Enfin, si nous considérons les cas où, en un point du tube, un seul phénomène varie : soit la vitesse, soit la pression, la figure 145 nous indique les conditions qui se sont produites. Elle nous montre que la variation d'un seul phénomène suppose la variation des deux conditions à la fois : de l'afflux et de l'écoulement.

En effet, considérons, dans cette figure, les intersections des deux lignes A′ 2 et 1 A, d'une part, et celle des deux autres lignes, 1 B et B′ 2, il est clair qu'à ces points d'intersections la pression est la même dans un même piézomètre, malgré des vitesses différentes. Or, on peut s'assurer que pour produire une telle condition, l'intersection de deux lignes de niveaux piézométriques, il faut faire varier à la fois l'afflux et l'écoulement.

On voit, par ce qui précède, que les conditions dans lesquelles se produit le mouvement des liquides, dans un système de conduits quelconque, ne sont complétement déterminées qu'autant que l'on connaît à la fois la pression et la vitesse du liquide.

Si on transporte à la circulation du sang les notions préalablement établies dans les expériences hydrauliques, on doit conclure que, pour juger des changements qui se produisent dans le cours du sang, pour faire la part de ce qui tient à des modifications dans le travail du cœur et de ce qui dépend des changements survenus dans le diamètre des capillaires, il ne faut pas se borner à l'emploi du manomètre, mais étudier à la fois la pression et la vitesse du sang. J'ai résumé, dans le tableau suivant, les différentes conditions de force du cœur ou de résistance des vaisseaux qui peuvent se présenter dans la circulation. On connaîtra l'état de la circulation du sang lorsqu'il sera déterminé par ses deux facteurs : la pression et la vitesse.

VARIATIONS DE LA VITESSE ET DE LA PRESSION DU SANG DANS LES ARTÈRES.

CAUSES DE CES VARIATIONS.
- **1° Cause centrale. — Cœur.** — *Afflux variables.*
- **2° Cause périphérique. — Vaisseaux contractiles.** — *Résistances Variables.*

1er CAS. *Variations d'un seul facteur* (pression ou vitesse), *l'autre restant constant :*

A. — Vitesse restant constante	Pression augmente	Action du cœur augmentée et Résistances périphériques augmentées.
	Pression diminue	Action du cœur diminuée et Résistances périphériques diminuées.
B. — Pression restant constante	Vitesse augmente	Résistances périphériques diminuées et Action du cœur augmentée.
	Vitesse diminue	Action du cœur diminuée et Résistances périphériques augmentées.

2e CAS. *Variations des deux facteurs à la fois :*

A. — En sens inverse	Vitesse augmente Pression diminue	Résistances périphériques diminuées.
	Vitesse diminue Pression augmente	Résistances périphériques augmentées.
B. — Dans le même sens	Vitesse augmente Pression augmente	Action du cœur augmentée.
	Vitesse diminue Pression diminue	Action du cœur diminuée.

L'assimilation de l'appareil circulatoire à celui qui vient d'être décrit dans la figure 145 est parfaitement légitime. Personne ne conteste plus la décroissance de pression dans l'arbre artériel à mesure qu'on s'éloigne du cœur. Les expériences de Poiseuille, qui croyait avoir trouvé une pression uniforme dans toutes les artères de gros et de moyen calibre, ont été contredites par des expériences plus récentes, et l'on comprend, du reste, ce qui avait pu induire Poiseuille en erreur. C'est, d'une part, la difficulté d'estimer d'une manière précise la pression indiquée par un manomètre qui oscille, et, d'autre part, la faible décroissance de la pression dans les artères, tant qu'elles gardent un assez gros calibre. — Ce dernier fait tient à ce que l'obstacle maximum au mouvement du sang n'est pas dans les artères, mais plus loin, dans les artérioles et dans les capillaires.

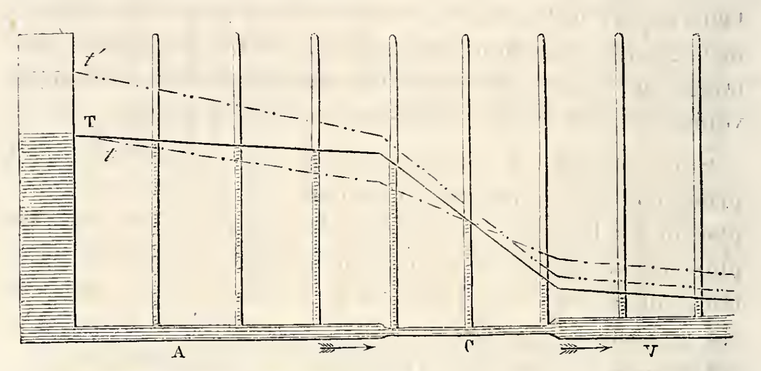


Fig. 146. — Schéma de la distribution de la pression du sang dans les différents points du système vasculaire.

Il n'est pas inutile de représenter ici la figure théorique (fig. 146) qui montre comment varie la pression du sang dans les différents points du système vasculaire. Cette figure reproduit les conditions de l'expérience de Bernouilli, non plus, comme précédemment, en opérant sur un tube également calibré, offrant par conséquent des résistances constantes sur tous les points de sa longueur, mais sur un tube dont le calibre changeant imite les changements de résistances que le sang éprouve, suivant qu'il traverse les artères, les capillaires ou les veines.

Le tube d'écoulement horizontal n'est pas uniformément

calibré comme dans la fig. 145, mais présente, dans une partie, un diamètre moyen, A, correspondant au système artériel; une autre partie plus étroite, C, correspond aux vaisseaux capillaires; une troisième enfin, V, plus large, imite les conditions où se trouve le système veineux.

Dans cette figure, la ligne des niveaux piézométriques n'est plus une droite, car les résistances qui font décroître la pression ne sont plus les mêmes aux différents points du tube d'écoulement.

Soit T (ligne pleine) le niveau des piézomètres sur toute la longueur du tube, on voit que, dans la partie A (système artériel), en amont du passage résistant que présente les capillaires, la pression décroît très-peu. — Dans les capillaires C, la pression décroît bien plus vite, ce qui tient à la consommation de la force motrice, ou pression, par les résistances.— Dans la portion V veineuse, la pression est très-faible, à cause de la grande consommation produite par les résistances préalables, en C; cette pression diminue très-lentement dans les veines, à cause du peu de résistances qu'elle éprouve.

Si on élargit les vaisseaux capillaires, ce qui diminue la principale résistance au mouvement du sang, les niveaux se placent sur la ligne *t*, dont la pente plus rapide exprime une plus grande vitesse d'écoulement. — Dans la région capillaire, au contraire, la pression décroît moins vite, puisque, sur une même longueur de tube plus large, il y a moins de résistances au passage, d'où moins de consommation de la pression. — Enfin, le système veineux reçoit le liquide avec une pression plus forte; la région capillaire elle-même reçoit, dans la partie la plus éloignée de la source d'afflux, une pression plus forte que dans le cas d'étroitesse de la région C.

Si l'on augmente la charge du réservoir, c'est-à-dire la force d'afflux, on constate une plus grande pente du niveau, c'est-à-dire une augmentation de vitesse dans tous les points du système, et une augmentation de pression, surtout dans le système artériel.

Tout se passe donc comme dans les conditions de l'expérience représentée fig. 145, avec cette seule différence, que les résistances au mouvement du liquide ne sont pas unifor-

mes (1), et qu'elles imitent mieux celles qu'on rencontre dans la circulation du sang (2).

L'appareil schématique décrit fig. 146 représente le système capillaire comme un conduit unique, plus ou moins résistant; mais, dans l'appareil circulatoire, les conditions sont plus complexes. La résistance totale du système capillaire sanguin est la résultante d'une foule de résistances locales, qui peuvent varier indépendamment les unes des autres. Si nous considérons l'aorte, réservoir commun à toutes les artères, la pression, dans ce vaisseau, variera infiniment peu lorsqu'une influence vaso-motrice s'exercera en un point très-restreint de l'appareil circulatoire. Un relâchement ou un resserrement vasculaire n'aura d'effet sur la tension aortique que s'il porte sur une région assez étendue. En outre, on peut concevoir que des troubles vaso-moteurs n'aient aucun effet sur la tension aortique, s'ils se compensent entre eux; si, par exemple, un resserrement des capillaires, en certain point, coïncide avec un relâchement dans une autre région. Ces conditions compliquent beaucoup l'étude de la tension artérielle; les rappeler, c'est montrer qu'on ne doit pas, d'après une seule variation du niveau d'un manomètre, conclure à la production d'un changement dans l'activité cardiaque ou dans la résistance des capillaires.

Enfin, pour terminer ce qui est relatif aux rapports de la pression à la vitesse du sang dans les artères, il faut signaler la solidarité qui existe entre les branches artérielles émanées d'un même tronc. Dans le cas d'une bifurcation artérielle, si on oblitère l'une des branches, l'autre présente une pression

(1) C'est en rétrécissant le tube d'écoulement que nous avons imité l'obstacle que présente la région capillaire; on sait que, dans l'appareil circulatoire, le système capillaire représente, au contraire, la partie la plus large de l'arbre vasculaire, mais il n'en est pas moins la partie la plus résistante au cours du sang à cause des nombreux frottements qui s'y produisent.

(2) On doit remarquer, dans la figure 146, que la pente des niveaux piézométriques est plus grande dans la région C qui représente les capillaires, lorsque cette région est étroite que lorsqu'elle est large. Or, nous avons vu que cette pente exprime la vitesse du courant.

La pente des niveaux piézométriques ne croît avec la vitesse que s'il s'agit d'un même tube, comme dans la fig. 145, mais on ne saurait comparer la vitesse d'écoulement, dans deux tubes différents, d'après la pente des niveaux piézométriques.

plus grande et le sang y coule d'un mouvement plus rapide ; les choses s'y passent donc comme si la force impulsive du cœur avait été accrue. Ainsi, les relations indiquées dans le tableau, p. 353, entre les changements de la force du cœur ou de la résistance des vaisseaux, d'une part, et les variations de la vitesse et de la pression du sang, d'autre part, ne sont applicables à la circulation du sang qu'avec certaines restrictions, dont le physiologiste devra tenir compte.

Supposons qu'on explore la vitesse et la pression du sang dans une artère des membres thoraciques, tandis qu'on exerce une compression sur l'aorte abdominale, on constatera dans l'artère explorée un accroissement de la pression et de la vitesse du sang, absolument comme s'il était survenu une augmentation de la force du cœur, tandis qu'en réalité c'est un obstacle à l'écoulement sanguin qu'on a produit.

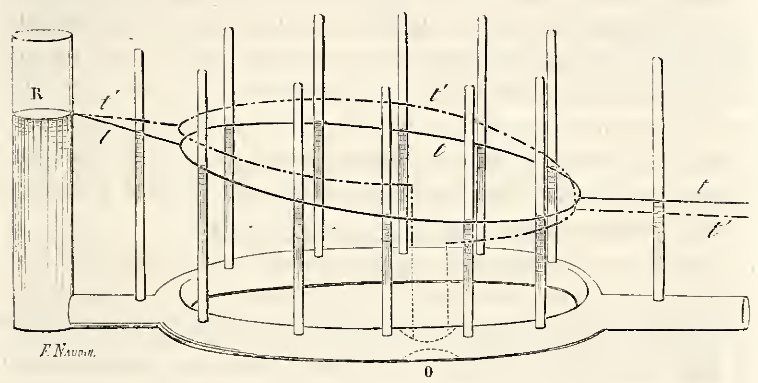


Fig. 147. — Répartition de la pression et de la vitesse dans un tube quand on oblitère les voies collatérales d'écoulement.

Soit (figure 147) un réservoir R versant du liquide dans un conduit qui se divise en deux branches, divergentes d'abord, puis convergentes et se réunissant de nouveau pour former un conduit unique. Dans le milieu de son parcours, le liquide aura deux chemins pour s'écouler ; prenant à la fois ces deux voies, il passera, dans chacune, avec moins de vitesse et trouvera moins de résistance que s'il n'avait qu'un seul passage.

Si des piézomètres étaient placés sur les différents points de ce conduit à double voie, leurs niveaux seraient sensiblement sur les lignes *t*, *t*, *t*.

Comprimons le conduit de droite en O, de manière à l'oblitérer et à faire cesser tout courant dans cette branche, la pression se répartira d'une manière nouvelle, indiquée dans la figure 147 par une ligne ponctuée. Or, cette disposition nouvelle des niveaux dans la branche gauche ressemble à ce qui fut arrivé si on eût élevé le niveau du réservoir R.

Pour juger, d'après les changements de la pression et de la vitesse du sang, s'il s'est produit un changement dans la perméabilité des vaisseaux capillaires, il faut explorer la pression et la vitesse dans l'artère même d'où émanent les capillaires sur lesquels on agit. C'est ainsi que cela se passe lorsqu'on explore la vitesse du sang dans la carotide, en même temps qu'on agit sur le cordon cervical du grand sympathique, ou tandis qu'on fait faire à l'animal des mouvements de mastication.

Nous reviendrons plus tard sur les diverses influences physiologiques qui font varier la pression dans les différents points du système vasculaire.

III. — De la pression variable.

A) *Pression variable.* C'est l'effet des ondées systoliques envoyées par le ventricule ; les sphygmographes seuls traduisent fidèlement cette pression variable sous la forme du *pouls ;* — formes différentes du pouls suivant la vitesse de pénétration du sang dans les artères. — Rapports de la pression constante à la pression variable : 1° Variations de même sens sous l'influence du cœur ; 2° Variations de sens inverses sous l'influence des vaisseaux périphériques. — Vérification au moyen du schéma.

B) *Vitesse variable.* Expériences sur le schéma.— Rapports de la vitesse variable avec la pression variable : *a*) quand la force du cœur change; *b*) quand la résistance capillaire change ; *c*) quand on comprime une artère collatérale ; *d*) quand on change la fréquence des mouvements du cœur.

Quand le système artériel, déjà rempli de sang, reçoit du cœur une ondée nouvelle, il en résulte un accroissement de la pression intérieure ; puis, pendant le repos du cœur, l'écoulement qui se fait à travers les vaisseaux capillaires fait baisser la pression et la ramène à son point de départ ; une

nouvelle ondée ventriculaire la relève de nouveau pour un instant, et ainsi de suite. Quand le régime régulier de la circulation est établi, il s'écoule autant de sang par les capillaires qu'il en entre par l'orifice aortique, de sorte que la pression artérielle oscille autour d'une moyenne fixe.

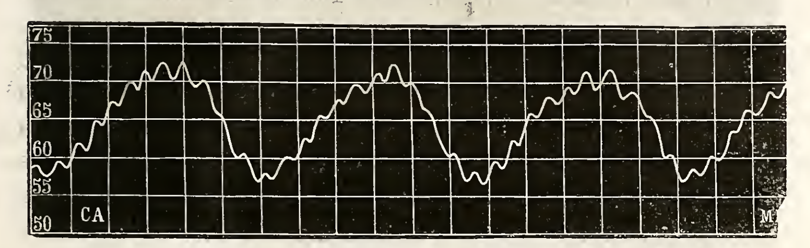


Fig. 148. — Pression du sang dans la carotide d'un chien, mesurée avec le kymographion de Ludwig.

Les manomètres révèlent ces variations de la pression, mais en altérant plus ou moins la forme de la courbe ; le sphygmographe et le sphygmoscope en fournissent l'expression fidèle. Or, l'emploi de ces instruments nous montre que, suivant la vitesse de pénétration du liquide, les choses se passent d'une manière plus ou moins compliquée. Si l'impulsion du cœur est lente, l'afflux sera représenté par une courbe dont l'aspect rappellera assez bien la phase systolique de la pression intraventriculaire. Après cette première période, on verra la pression baisser régulièrement sous l'influence de l'écoulement du sang. La figure 149 montre l'état variable de la pression dans des conduits où le sang circule sous l'influence d'un cœur de tortue.



Fig. 149. — Variations de la pression artérielle d'une tortue.

Si l'impulsion du cœur est brusque, aux mouvements alternatifs d'ascension et de descente viendront s'ajouter les

effets de l'onde liquide (voir, Mémoire III), qui compliquent la courbe de la pression variable (fig. 150), tout en permettant d'en reconnaître les différents éléments.

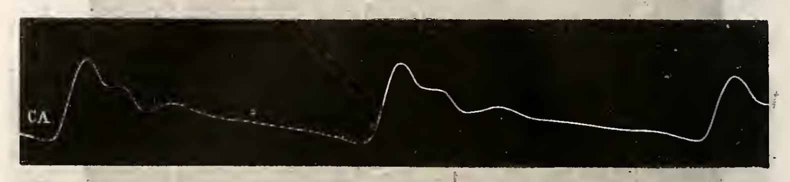


Fig. 150. — Pouls carotidien de l'homme (très-amplifié).

Ainsi, dans le régime régulier de la circulation du sang, la pression artérielle ne tombe jamais à zéro ; il reste toujours dans les artères une pression constante dont la valeur change, ainsi qu'on l'a vu précédemment, suivant les changements qui surviennent dans la force du cœur ou dans la résistance des vaisseaux. Cette pression constante n'est révélée que par les manomètres dans lesquels on fait pénétrer le sang (fig. 148). Les sphygmographes, tout en ne signalant que la pression variable, ne peuvent-ils, en certains cas, nous fournir une mesure indirecte de la pression constante ? C'est ce qu'il faut examiner.

Un fait qui ressort des expériences de tous les physiologistes, c'est qu'en général la pression constante et la pression variable varient en sens inverse l'une de l'autre. C'est-à-dire que si la pression constante est élevée l'amplitude des oscillations sera faible ; tandis que si la pression constante est basse les oscillations auront une plus grande amplitude.

La quantité dont chaque systole du cœur élève la pression du sang dans l'aorte représente l'excès de la force du cœur sur la pression aortique. Cet excès peut varier sous deux influences différentes : soit par une augmentation de la force du cœur, soit par une diminution de la pression du sang.

En se plaçant dans des conditions simples où l'on puisse à volonté faire varier l'un ou l'autre de ces facteurs, en opérant par exemple sur le schéma décrit précédemment, on constate que :

Si la tension artérielle s'élève par accroissement de la force du cœur, cette élévation s'accompagne d'accroissement de l'amplitude du pouls.

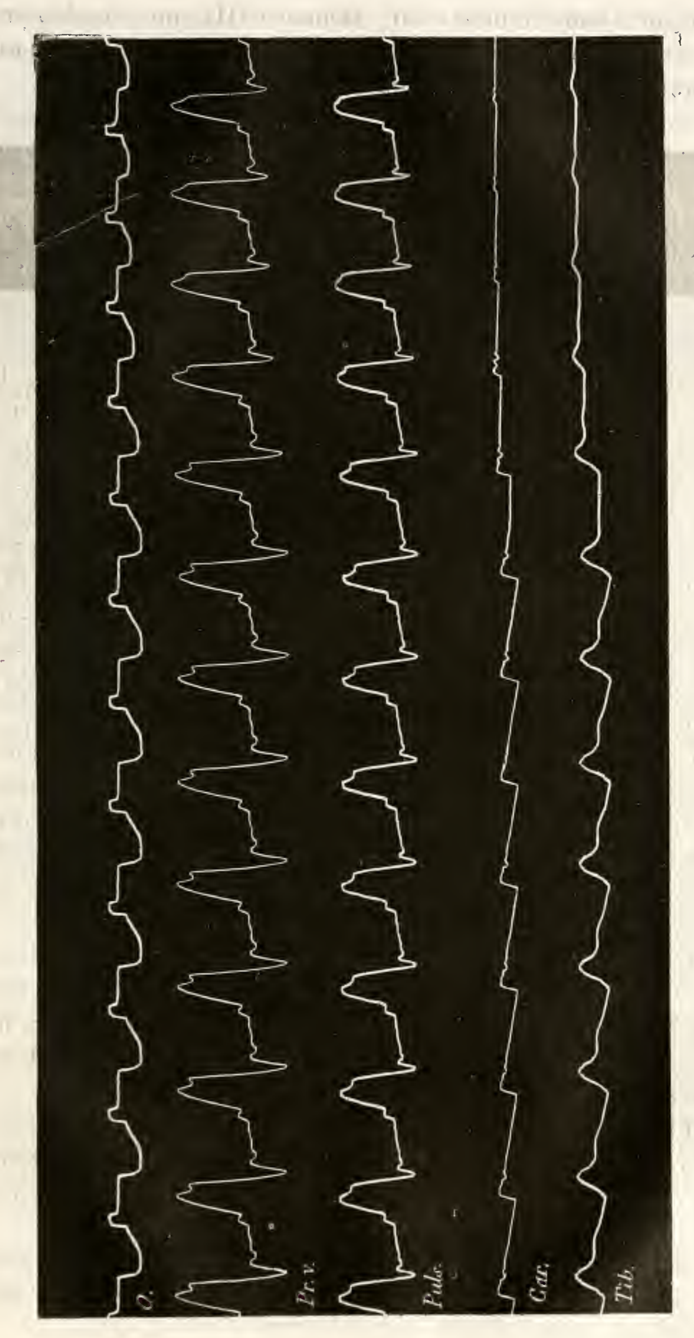


Fig. 151. — Montrant la diminution de l'amplitude du pouls sous l'influence d'un obstacle à la circulation artérielle qui élève la pression du sang.

Si la tension artérielle s'élève par suite d'obstacle à l'écoulement du sang par les capillaires, cet accroissement s'accompagne de diminution de l'amplitude du pouls.

Ces propositions sont particulièrement faciles à démontrer dans des conditions artificielles, les seules qui permettent de modifier, à coup sûr, l'élément impulsion et l'élément résistance. Or, si nous nous reportons aux expériences faites sur le schéma de la circulation, nous voyons, figure 151, que tandis que le cœur développe des efforts systoliques toujours les mêmes, ce dont on peut juger par les tracés de la pression ventriculaire et de la pulsation cardiaque, le pouls diminue d'amplitude quand un obstacle à l'écoulement du liquide vient élever la pression dans les vaisseaux. La théorie est toute simple ; aucun doute n'est possible sur l'origine du phénomène. En effet, la force du cœur est limitée, elle ne peut donc lutter contre la pression du sang artériel qu'autant que cette pression lui sera inférieure et il doit nécessairement arriver un moment où, la pression, s'élevant d'une manière graduelle par suite de la suppression de l'écoulement, cette pression sera précisément égale à la force du ventricule. A ce moment, l'effort du cœur n'enverra plus du tout de sang dans les artères, et toute variation de pression, toute pulsation, par conséquent, sera supprimée.

Nous pouvons également, au moyen du schéma, savoir ce qui arrive du côté de la pression variable, c'est-à-dire de la force des pulsations artérielles, quand on modifie la force du cœur toute seule, tandis que la résistance à l'écoulement du liquide reste la même.

On a vu (figure 45), à propos de la construction de cet appareil, que pour accroître ou diminuer la force impulsive du cœur, il suffit d'augmenter ou de diminuer le nombre des anneaux de caoutchouc qui servent d'intermédiaire dans la transmission du mouvement imprimé par la came. En opérant dans des conditions de force du cœur graduellement croissante, j'ai obtenu des amplitudes de plus en plus grandes de la pression variable à mesure que la force du cœur croissait. Conformément à ce que nous avons vu dans le précédent chapitre, la pression constante augmentait également par l'effet de l'accroissement de la force du cœur.

La figure 152 montre cet accroissement graduel des deux sortes de pression dans trois expériences successives : l'une faite avec un seul anneau de caoutchouc pour transmettre le mouvement au cœur, la seconde avec deux anneaux, la troisième avec trois anneaux.

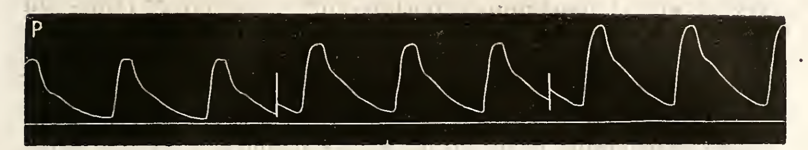


Fig. 152. — Accroissement de l'amplitude du pouls quand la force du cœur augmente.

Les deux expériences qui précèdent, faites dans des conditions où l'on modifie à coup sûr la force impulsive du cœur ou la résistance au cours du sang, me semblent bien plus concluantes que celles qu'on pourrait faire en s'adressant à la circulation du sang d'un animal. En effet, dans l'état actuel de la physiologie, il n'est guère possible d'agir à coup sûr et d'une manière exclusive, soit sur le cœur, soit sur les vaisseaux capillaires ; aussi l'interprétation des phénomènes physiologiques doit-elle, au contraire, découler de la parfaite connaissance des conditions hydrauliques du mouvement d'un liquide dans des conduits élastiques, où il est soumis à des impulsions et à des résistances variables.

Enfin, je ne saurais parler de l'amplitude des pulsations artérielles sans indiquer une influence qui réagit sur cette amplitude ; je veux parler de la fréquence des battements du cœur. J'ai longuement exposé ailleurs (1) le lien qui existe entre la fréquence et la force du pouls, en montrant que, suivant l'intervalle de temps qui sépare deux afflux successifs du sang que le cœur envoie, l'écoulement se fait plus ou moins abondamment à travers les capillaires, ce qui abaisse plus ou moins la pression artérielle. Or, une systole qui se fait dans les conditions de basse pression lance plus de sang que si la pression était forte ; c'est pourquoi, dans le pouls irrégulier, la pulsation qui suit un grand intervalle a plus de hauteur que les autres.

(1) *Physiol. méd.*, p. 240.

Quand on opère sur le schéma, on règle à volonté la fréquence des systoles du cœur; mais il en est autrement dans la circulation du sang. S'il est vrai que la fréquence des mouvements cardiaques soit liée à la pression artérielle, de telle sorte que plus la pression est basse, plus le cœur bat vite et inversement, cette variation de la fréquence doit avoir précisément pour effet de rendre moins inégale la pression constante du sang dans les artères et moins inégales aussi les oscillations de la pression variable.

Mais je ne puis m'étendre davantage sur ce sujet: l'influence de la pression artérielle sur la fréquence des battements du cœur étant encore contestée, il y aura lieu, dans un prochain mémoire, d'en prouver la réalité.

B) *De la vitesse variable du sang dans les artères.*

Chauveau a montré comment chaque variation de la pression produite par la systole du cœur s'accompagne d'une variation parallèle de la vitesse; il a fait voir l'analogie qui existe entre la variation de pression qui constitue le pouls et la variation de la vitesse du sang qui se produit d'une manière simultanée; analogie telle, qu'on peut trouver dans le tracé de la vitesse variable les effets de la systole du ventricule, ceux de la clôture des valvules sigmoïdes, enfin l'oscillation de l'onde qui constitue le dicrotisme du pouls.

Chauveau chercha ensuite à vérifier sur les animaux certaines théories que j'avais émises au sujet des relations qui doivent exister entre la pression et la vitesse du sang (1). Il vit que, dans tous les cas où la pression artérielle s'abaisse par suite d'un passage plus facile du sang à travers les petits vaisseaux, cet abaissement de la tension s'accompagne d'un accroissement de la vitesse du sang. L'auteur a cherché à déterminer, au moyen d'expériences très-nombreuses, l'influence que différentes conditions, telles que la section de certains nerfs, la ligature de certains vaisseaux, les hémorragies, etc., exercent sur la vitesse du sang. Dans la plupart des cas, il était tenu compte, en même temps, de l'état de la pression.

(1) *Journal de la physiol. de l'homme et des animaux*, t. III, 1860, p. 712.

Je reviendrai sur ces remarquables expériences en montrant que leurs résultats s'expliquent tous par des lois très-simples que l'emploi du schéma va permettre de saisir.

On a vu, à propos de la pression et de la vitesse constantes, qu'il faut distinguer deux influences opposées qui peuvent les modifier :

1° Des influences de cause centrale : changements dans la force impulsive du cœur ; elles font varier *dans le même sens*, la pression et la vitesse du sang.

2° Des influences de cause périphérique : obstacle plus ou moins grand à l'écoulement du sang à travers les capillaires ; ces influences agissent *en sens inverse* sur la pression et sur la vitesse.

La même distinction doit être établie au sujet de la pression et de la vitesse variables.

a) Influence des changements dans la force d'afflux du sang.

1° Si l'on comprime l'artère en amont des instruments qui y explorent la pression et la vitesse, on voit les deux courbes tomber à zéro (fig. 153). (C'est même le moyen dont on se



Fig. 153. — Pression et vitesse du sang supprimées toutes deux quand l'artère est comprimée en amont des instruments.

sert pour déterminer le zéro de l'échelle des deux instruments.)

2° Si l'on change successivement la force impulsive du

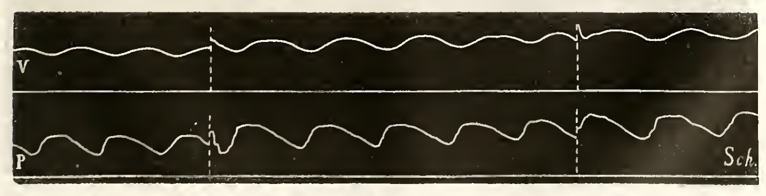


Fig. 154. — Pression et vitesse augmentant toutes deux avec la force du cœur.

cœur (en changeant le nombre des anneaux de caoutchouc. *Voy.* p. 362), on constate, dans la pression et dans la vitesse, des modifications de même sens. Dans la figure 154, la pression et la vitesse variables augmentent toutes deux d'intensité. C'est ainsi que se comportent également la vitesse et la pression constantes quand c'est la force du cœur qui change.

3° Si l'on rend plus brusques les changements systoliques de la pression du sang dans les vaisseaux, ce qu'on obtient en diminuant l'élasticité de l'aorte, on modifie de la même manière la vitesse et la pression variables ; on leur donne, à toutes deux, une brusquerie plus grande (fig. 155) sans rien

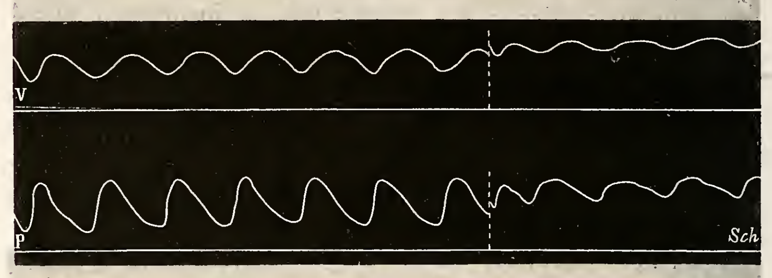


Fig. 155. — Pression et vitesse modifiées toutes deux par un changement de l'élasticité de l'aorte.

changer à la vitesse ni à la pression moyenne, car on n'a pas modifié la force de l'afflux sur la quantité de l'écoulement par les capillaires.

b) Influence des changements dans l'écoulement du sang.

1° Si l'on comprime le tube en aval des appareils, on voit, tandis que la pression s'élève, la vitesse diminuer.

Ainsi, dans la figure 156, on a oblitéré entièrement le tube

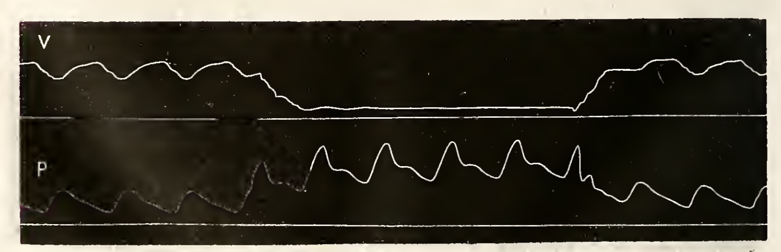


Fig. 156. — Vitesse supprimée et pression augmentée par un obstacle au cours du sang en aval des appareils.

artère ; toute vitesse a été supprimée, mais la pression variable s'est accrue sous cette influence, de même que la pression constante.

2° Si l'on diminue graduellement la perméabilité du vaisseau, on voit l'antagonisme de la pression et de la vitesse se manifester graduellement comme dans la figure 157.

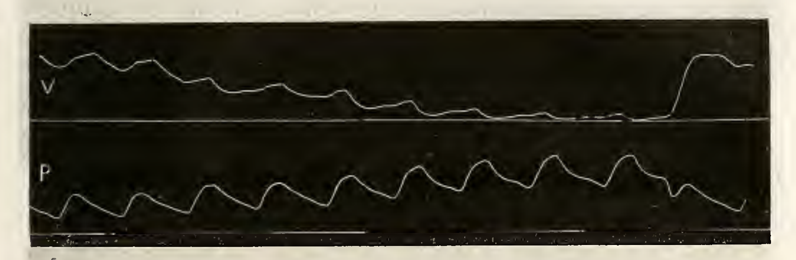


Fig. 157. — Compression graduelle du vaisseau en aval des appareils.

3° Si l'on termine le tube artère par des ajutages d'écoulement de calibres plus ou moins larges, et si on recueille trois

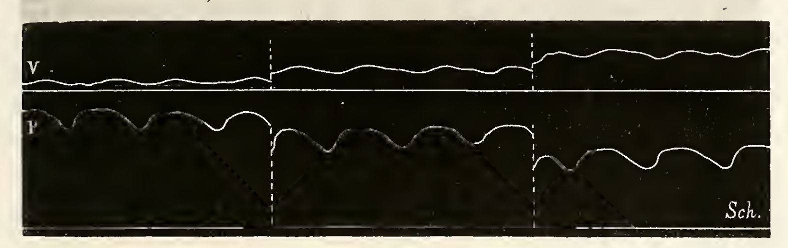


Fig. 158. — Ajutage d'écoulements de plus en plus large; la vitesse et la pression varient en sens inverse.

séries successives de tracés, avec trois ajutages de plus en plus larges, on constate nettement : que la pression variable, aussi bien que la pression constante, varient en sens inverse des vitesses variable et constante (fig. 158).

Influence de la compression de branches collatérales.

c) A côté de ces influences, il faut placer les changements qui surviennent dans la circulation d'une artère quand on comprime des branches collatérales. Nous avons vu précédemment que, dans ces conditions, la vitesse et la pression con-

stantes variaient dans le même sens, s'élevant toutes deux, comme si la force impulsive du cœur était augmentée. La figure 159 nous montre ce qui se passe alors du côté de la



Fig. 159. — Compression d'une branche collatérale, variations de même sens dans la pression et la vitesse,

pression et de la vitesse variables : toutes deux diminuent à la fois. Or, on sait, d'après les expériences précédentes, que si la force du cœur augmente, la pression variable présente des oscillations plus étendues.

Il devient donc facile de distinguer les cas où la pression s'élève dans une artère, par accroissement de la force du cœur, de ceux où ce phénomène est dû à l'oblitération de voies collatérales. Dans le premier cas, en même temps que P et V constants augmentent, P et V variables augmentent aussi. Dans le cas d'oblitération d'une artère collatérale, l'augmentation de P et V constants s'accompagne de diminution de P et V variables.

Effets des changements de fréquence des mouvements du cœur.

d) Enfin, les effets des changements de la fréquence des systoles du cœur sur la vitesse variable sont les mêmes que ceux qui se produisent du côté de la pression variable (fig. 160)

On peut formuler ainsi la loi qui préside aux changements de la vitesse et de la pression du sang.

Toutes les fois que le cœur modifie son action d'une certaine manière, il s'ensuit, dans la pression et dans la vitesse du sang, des modifications parallèles. Toutes les fois, au contraire, que la circulation périphérique modifiée fait changer le mouvement du

sang, elle amène des variations inverses dans la pression et dans la vitesse.

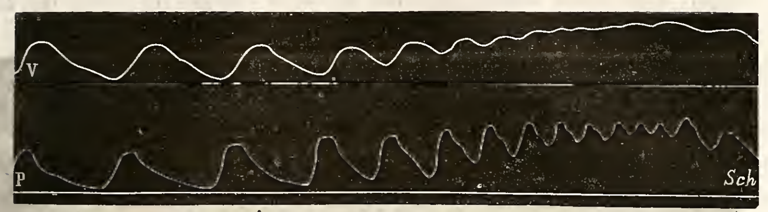


Fig. 160. — Effets de l'accélération des mouvements du cœur.

Nous pourrons maintenant prendre une à une les expériences de Chauveau et de ses élèves : l'interprétation des tracés qu'ils ont recueillis ne présentera plus de difficulté. Cette étude sera l'objet d'un travail ultérieur.

Le but du présent mémoire était de montrer qu'on peut, en combinant l'emploi du manomètre avec celui d'un explorateur de la vitesse du sang, savoir, lorsqu'il survient un changement dans l'état circulatoire, si ce changement est dû à l'action du cœur ou à celle des vaisseaux périphériques.

CONCLUSIONS.

1° La connaissance de la pression du sang dans les artères ne saurait suffire pour déterminer l'état de la circulation, car cette pression peut s'élever sous deux influences bien distinctes : soit par un accroissement de la force du cœur, soit par une augmentation de la résistance des petits vaisseaux. Inversement, la pression artérielle peut diminuer, soit par l'affaiblissement de l'action du cœur, soit par le relâchement des vaisseaux ;

2° La vitesse du sang dans une artère ne saurait non plus, à elle seule, déterminer l'état de la circulation, car cette vitesse, de même que la pression, peut varier sous deux influences : soit un changement dans la force du cœur, soit une

modification dans la résistance que présentent les petits vaisseaux, suivant qu'ils sont contractés ou relâchés ;

3° Pour savoir, en toute circonstance, à quoi tient un changement qui se produit dans la circulation, il faut connaître à la fois la pression et la vitesse du sang ;

4° Les lois de Bernouilli, transportées aux conditions hydrauliques du mouvement du sang, montrent que si une élévation de la pression du sang s'accompagne d'augmentation dans la vitesse de la circulation, c'est qu'il s'est produit une augmentation dans la force du cœur ; tandis que l'accroissement de la pression accompagné de diminution de la vitesse exprime un resserrement des petits vaisseaux et un plus grand obstacle au cours du sang ;

5° La diminution de pression accompagnée de diminution de vitesse signifie un affaiblissement de l'action cardiaque, tandis que si elle est liée à un accroissement de la vitesse elle tient au relâchement des petits vaisseaux ;

6° Pour vérifier ces lois et pour faciliter les mesures de la vitesse du sang, et en général de tout liquide qui circule dans des conduits, j'ai construit un nouvel instrument basé sur le principe du tube de Pitot. Cet instrument semble plus sensible que tous ceux qu'on a employés jusqu'ici ;

7° On a l'habitude de distinguer dans la pression du sang deux éléments : l'un constant et l'autre variable ; ce dernier tient à l'action discontinue du cœur. La même distinction, déjà faite par Chauveau, relativement à la vitesse du sang, est très-utile en pratique ;

8° J'ai montré que si la pression constante s'élève tandis que la pression variable diminue, cela indique un accroissement de la résistance, c'est-à-dire un resserrement des capillaires ; tandis que si la pression constante s'abaisse tandis que la pression variable augmente, cela exprime une diminution de résistance, c'est-à-dire un relâchement des capil-

laires. C'est ainsi que la mesure de la pression toute seule peut renseigner sur l'état de la circulation, à la condition qu'on tienne compte à la fois de son élément constant et de son élément variable ;

9° Le schéma de la circulation permet de vérifier toutes ces lois dans des conditions bien déterminées de force impulsive du liquide ou de résistance à l'écoulement, tandis que si l'on opère sur le vivant, on ne peut savoir *a priori* si l'action qu'on provoque s'exerce sur l'élément puissance (le cœur), ou sur l'élément résistance (les petits vaisseaux).

(*A suivre.*)

TABLE DES FIGURES

APPAREILS.

I. Appareils pour l'exploration

TABLEAUX.

NOTATION.

FIGURES SCHÉMATIQUES.

TRACÉS.

III. Tracés de la durée des phénomènes.

IV. Tracés des mouvements.

V. Tracés myographiques.

VI. Tracés des ondes liquides.

VII. Tracés de la pression de l'air.

VIII. Tracés de la pression artérielle.

IX. Tracés de la pression et de la vitesse des liquides.

X. Tracés des signaux.

XI. Tracés des vibrations.

TABLE ALPHABÉTIQUE DES MATIÈRES

A

C

D

E

F

G

H

I

L

M

N

O

P

Q

R

S

T

V

Clichy. — Impr. Paul Dupont, rue du Bac-d'Asnières 12. (685, 9-5.

